



Leandro Freitas Gomes

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Caracterização material da Muralha Fernandina de Lisboa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professora Doutora Paulina Faria, Professora Associada, Faculdade
de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor António Santos Silva, Investigador Auxiliar, Laboratório
Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rodrigo de Moura Gonçalves

Arguente: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Doutor António Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2019

Caracterização material da muralha Fernandina de Lisboa e propostas de intervenção

“Copyright” © Leandro Freitas Gomes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Finalizada esta tão importante fase da minha vida académica não posso deixar de manifestar o apoio e gratidão a todos aqueles que de alguma forma contribuíram e estiverem presentes para ajudar, motivar e incentivar ao sucesso da realização desta dissertação.

Aos meus orientadores científicos, Professora Doutora Paulina Faria e Doutor António Santos Silva, agradeço pelo desafio que me propuseram, o incentivo, interesse, acompanhamento e disponibilidade demonstrados ao longo destes últimos meses de trabalho.

Ao Eng.º Vítor Silva pela ajuda e aconselhamento nos laboratórios do DEC, mas também em toda a campanha experimental laboratorial e *in situ*, sem os seus conhecimentos não seria possível a sua realização.

Agradeço ao Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais do LNEC e à sua equipa, sem exceção, que me acompanhou e ajudou em toda a campanha experimental, tanto *in situ* como química e mineralógica, e disponibilizou todos os materiais e equipamentos necessários para a sua execução, de modo particular ao estudante de doutoramento Luís Almeida pelos seus vastos conhecimentos na área da geologia mas também à bolseira de experimentação Dora Soares pelo esclarecimento de dúvidas, ao técnico superior Nuno Garcia pela ajuda na extração de amostras e à assistente operacional Fátima Meneses por toda a cooperação concedida em laboratório.

À Dra. Manuela Leitão do Centro de Arqueologia de Lisboa do Departamento de Património Cultural da Câmara Municipal de Lisboa e à Dra. Maria José Sequeira do Departamento dos Bens Culturais da Direção Geral do Património Cultural pelo suporte em todo o trabalho de campo, por me terem possibilitado, em conjunto com os proprietários e responsáveis dos locais visitados, o acesso à estrutura amuralhada e consequentemente a extração da amostragem e pela partilha do seu conhecimento face ao contexto dos locais intervencionados.

Refiro ainda um agradecimento aos Arqueólogos António Valongo, Artur Rocha e Alexandra Krus, ao Arquiteto Carlos Sousa Valles, ao Arquiteto Luís Lamas e Dr^a Ana Prosérpio da Sociedade Histórica da Independência de Portugal, à Dra. Ana Duarte Diretora da Escola Básica e Secundária Gil Vicente, à Sra. Isabel Maria Lechner, aos Engenheiros Joni Silva e José Neiva Vieira, ao Dr. Nuno Almeida Pereira da VIPGEST, ao Dr. Pedro Pinto do Corpo Santo Hotel, à Sra. Cheila Veloso e Sr. Carlos Mestre do Condomínio Terraços de Bragança pelas informações partilhadas e facilidades concedidas no acesso aos locais visitados.

Os agradecimentos vão também para a Fundação para a Ciência e Tecnologia e para o LNEC pelo seu apoio através dos projetos DB-HERITAGE (Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial – PTDC/EPH-PAT/4684/2014) e DUR-HERITAGE (Durabilidade e conservação de materiais com interesse histórico) no qual a presente dissertação se insere.

Aos meus amigos de longa data, Rita, Vasco e João, que me acompanham ao longo de vários anos, pelas conversas, experiências e sobretudo pela amizade e momentos de descontração durante a dissertação.

Aos amigos e colegas de curso que desenvolveram as suas dissertações no LNEC e que me acompanharam durante o período de tempo em que lá estive: Miguel Pires, Alexandre Lopes, Magda Sá, Manuel Gomes, Pedro Marinheiro e Ana Elias, um obrigado pelos bons momentos proporcionados. A todos os restantes amigos que fiz durante estes anos na faculdade, pelo seu companheirismo e amizade, em especial, ao Igor Varagilal, à Catarina Fonseca e ao Rafael Serra.

À minha irmã, Soraia Gomes, pelas palavras de motivação, preocupação e conselhos que mesmo à distância esteve sempre presente nos momentos em que mais precisei.

As últimas palavras, e mais importantes, destinam-se aos meus pais pelo enorme esforço que fizeram para que eu chegasse a este patamar e que, de um modo especial, estiveram sempre generosamente a meu lado e permitiram que me dedicasse exclusivamente aos meus estudos. Um obrigado não é suficiente.

Caracterização material da Muralha Fernandina de Lisboa

O património arquitetónico tem sido bastante intervencionado com vista a assegurar a sua conservação. No entanto, as intervenções nem sempre têm sido eficientes nem têm assegurado a compatibilidade entre materiais de forma a garantir a sua efetiva conservação e, assim, preservar toda a originalidade e valor (material, social e cultural) que representam. Para a conceção e realização de intervenções eficientes e compatíveis é indispensável aceder a dados obtidos por caracterização material, que muitas vezes é inexistente.

A Muralha Fernandina de Lisboa - estrutura amuralhada construída em Portugal na segunda metade do século XIV - integra o património arquitetónico português. Para além de troços de muralha, inclui outros elementos como torres, cubelos (pequenas torres), entradas e postigos (pequenas portas). Partindo da informação existente, obtida por fontes bibliográficas, mas também orais, procedeu-se a uma inspeção visual em diversos troços da muralha, bem como à realização de ensaios não destrutivos *in situ* e à recolha de amostras de argamassas da alvenaria para ensaios laboratoriais de caracterização química, mineralógica, física e mecânica.

Assim, após um enquadramento geral, onde são referidas algumas intervenções efetuadas na muralha nos últimos 20 anos, são descritos os troços inspecionados e os locais onde se procedeu à recolha de amostras e à realização de ensaios *in situ*. Seguidamente é apresentada a metodologia e procedimentos experimentais aplicados e, no final, os resultados da caracterização laboratorial efetuada e é feita a sua discussão.

Os resultados obtidos indicam terem sido empregues diferentes materiais e tecnologias na construção da muralha, destacando-se a taipa e as alvenarias de pedra regular e principalmente de pedra irregular com argamassas à base de cal aérea com diferentes traços e agregados, muito provavelmente conforme a disponibilidade de material *in loco* na cidade medieval de Lisboa. Os resultados dos ensaios *in situ* revelaram genericamente boas características de resistência mecânica superficial das paredes principais da muralha. Relativamente aos ensaios físico-mecânicos, estes indicaram elevados valores de resistências superficiais e massas volúmicas, bem como comportamentos muito distintos face ao contacto com a água. Pela análise química e mineralógica foi possível comprovar que os materiais constituintes da estrutura indicam dosagens de ligante muito variáveis entre os vários locais estudados.

Apesar da amostragem ter sido reduzida face à extensão da muralha, e se ter verificado a utilização de materiais de composição muito diversificada, os resultados que foram obtidos e a sua análise integrada possibilitou avaliar as características gerais da muralha, as técnicas de construção empregues e a constituição material. Considera-se ter contribuído para suportar futuras intervenções de conservação da muralha, nomeadamente na aplicação de argamassas de reparação compatíveis que assegurem efetivamente a eficiência da conservação material das diferentes secções que constituem esta estrutura.

Palavras-chave: muralha Fernandina, cal, terra, argamassa, taipa, caracterização, conservação

Material characterization of Lisbon's Fernandina Old Wall

The historical architectural heritage has had several interventions in the last years to ensure its conservation. However, not always those interventions have been effective or compatible to assure the effective conservation and, thus, preserve all the originality and material, cultural and social values. For the design and to perform efficient and compatible interventions based on historical information it is essential to have access to data obtained by material characterization, which is often non-existent.

The Fernandina Old Wall of Lisbon – defensive walled structure built in the second half of the 14th century – is part of the Portuguese architectural heritage. Besides the main walls, it is composed by towers and small towers (in Portuguese known by “cubelos”), entrances and small doors (in Portuguese called “postigos”). Based on information obtained from literature but also oral and visual, several surveys were made on different sections of the Wall and *in situ* and laboratory tests were performed on extracted bore samples. After an assessment and analysis of the interventions made on the Wall in the last 20 years based on available documents, the different inspected sections, the location where the masonry mortar samples were removed and the performance of non-destructive *in situ* testing are described. The results of the laboratory characterization are also presented.

The results obtained reveals that different materials have been used in the Wall construction, including lime stabilized rammed earth (earth additivated with air lime and compacted in layers inside formworks), regular stone masonry and rubble stone masonry with lime mortars, with different volumetric dosage and aggregate as was the accessibility of material around the medieval city of Lisbon. The *in situ* testing results revealed in general good characteristics of mechanical superficial hardness in the main walls. For the physical and mechanical analysis, test results indicate high values of superficial hardness and different behaviors in contact with water. By chemical and mineralogical tests, it was possible to justify that the materials of the structure reveal many and different dosages among the several sections analyzed.

Despite the sampling have been reduced in view of the total extension of the Wall and have showed the use of materials with a very diverse composition, the results and its adequate analysis made it possible to evaluate the general characteristics of the Wall, the preparation and construction techniques, the identification of different material components and the results of the interventions occurred. Therefore, it is considered to have contributed to support decisions on future interventions, namely on the definition of repair mortars that need to be compatible and assure efficient conservation of sections that are being accessible of the Wall.

Keywords: Fernandina Wall, lime, rammed earth, mortar, characterization, conservation

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice de texto	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas.....	XIX
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	XXI
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Estrutura e organização da dissertação	2
2 A muralha Fernandina de Lisboa	3
2.1 A defesa da cidade de Lisboa	3
2.2 Descrição geral da muralha Fernandina de Lisboa.....	4
2.3 Traçado e composição da muralha	5
2.3.1 Torres.....	9
2.3.2 Cubelos.....	10
2.3.3 Portas.....	11
2.3.4 Postigos	12
2.4 Intervenções realizadas na muralha Fernandina de Lisboa.....	12
2.4.1 1998 e 2006 – Lanço Ocidental: Torre do Jogo da Péla	13
2.4.2 2016 – Lanço Oriental: São Vicente de Fora	14
2.4.3 2007/2008 – Lanço Fluvial Oriental: Largo do Chafariz de Dentro	17
2.4.4 2016/2017 – Lanço Fluvial Oriental: Rua do Terreiro do Trigo	18
2.4.5 2014 – Lanço Ocidental: Rua António Maria Cardoso	20
3 Descrição dos troços inspeccionados – casos de estudo	21
3.1 Caso de estudo 1: Torre do Jogo da Péla.....	22
3.2 Caso de estudo 2: Cubelo do Postigo de Santana	24
3.3 Caso de estudo 3: Muralha - Palácio da Independência.....	26

3.4	Caso de estudo 4: Muralha e Cubelos - Escola Básica e Secundária Gil Vicente	28
3.5	Caso de estudo 5: Muralha - Palácio da Rosa	29
3.6	Caso de estudo 6: Torre João Bretão - Corpo Santo Hotel	31
3.7	Caso de estudo 7: Muralha e Torre - Condomínio dos Terraços de Bragança	32
3.8	Caso de estudo 8: Muralha - Edifícios 6-26 da Rua Terreiro do Trigo.....	34
3.9	Caso de estudo 9: Muralha - Largo da Graça	36
4	Campanha experimental	37
4.1	Considerações gerais	37
4.2	Recolha de amostras <i>in situ</i>	37
4.3	Identificação, caracterização macroscópica e seleção das amostras	38
4.4	Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios <i>in situ</i>	47
4.4.1	Resistência superficial pelo esclerómetro pendular	47
4.4.2	Resistência superficial por choque de esfera.....	48
4.4.3	Absorção de água sob baixa pressão	49
4.4.4	Velocidade de propagação de ultrassons	50
4.5	Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios químicos e mineralógicos.....	51
4.5.1	Preparação das amostras.....	51
4.5.2	Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)	53
4.5.3	Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)	54
4.5.4	Determinação do resíduo insolúvel em ácido e observação visual	55
4.5.5	Análise granulométrica do resíduo do ataque ácido	56
4.6	Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios físicos e mecânicos	57
4.6.1	Condutibilidade térmica	58
4.6.2	Dureza superficial através do durómetro.....	58
4.6.3	Massa volúmica aparente.....	59
4.6.4	Módulo de elasticidade dinâmico	60
4.6.5	Absorção de água por capilaridade.....	61
4.6.6	Secagem.....	63
4.6.7	Resistência à compressão diametral.....	64
5	Resultados e discussão.....	65
5.1	Considerações gerais	65
5.2	Resultados da análise visual	65

5.3	Resultados da caracterização <i>in situ</i>	68
5.3.1	Resistência superficial pelo esclerómetro pendular	68
5.3.2	Resistência superficial por choque de esfera.....	70
5.3.3	Velocidade de propagação de ultrassons por método indireto	71
5.3.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de <i>Karsten</i>	72
5.4	Resultados da caracterização química e mineralógica	75
5.4.1	Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)	75
5.4.2	Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)	78
5.4.3	Determinação do resíduo insolúvel em ácido.....	79
5.4.4	Análise granulométrica do agregado nas argamassas e taipas	80
5.4.5	Determinação do traço das amostras argamassa e de taipa.....	81
5.5	Resultados da caracterização físico-mecânica	83
5.5.1	Condutibilidade térmica	83
5.5.2	Dureza superficial através do durómetro.....	84
5.5.3	Massa volúmica aparente.....	85
5.5.4	Módulo de elasticidade dinâmico	85
5.5.5	Absorção de água por capilaridade.....	87
5.5.6	Secagem.....	91
5.5.7	Resistência à compressão diametral.....	95
6	Conclusões	97
6.1	Considerações finais	97
6.2	Desenvolvimentos futuros	99
	Referências	101
	Anexos.....	A1
	Anexo A1 – Registo e características macroscópicas das amostras estudadas.....	A3
	Anexo A2 – Resultados detalhados da caracterização <i>in situ</i>	A9
	Anexo A3 – Caracterização individual dos provetes dos diversos casos de estudo	A15
	Caso de estudo 1 – Torre do Jogo da Péla.....	A15
	Caso de estudo 2 – Edifício da Calçada de Santana 137	A27
	Caso de estudo 3 – Palácio da Independência	A29
	Caso de estudo 4 – Escola Secundária e Básica Gil Vicente	A32
	Caso de estudo 5 – Palácio da Rosa	A38

Caso de estudo 6 – Corpo Santo Hotel.....	A43
Caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança	A46
Caso de estudo 8 – Edifícios 6-26 da Rua Terreiro do Trigo	A58
Caso de estudo 9 – Largo da Graça.....	A65
Anexo A4 – Resultados detalhados da caracterização físico-mecânica.....	A69
Anexo A5 – Resultados detalhados da caracterização química e mineralógica	A73

Índice de figuras

Figura 2.1 – Troços da Cerca Moura localizada em Alfama (a) e da muralha de D. Dinis localizada no edifício do Museu do Dinheiro (b)	3
Figura 2.2 - Traçado principal e limites da muralha Fernandina de Lisboa levantados nos anos de 1856/58.....	5
Figura 2.3 – Mapa do traçado das muralhas de Lisboa	6
Figura 2.4 - Lanço Ocidental: (a) troço da muralha no Palácio da Rosa; (b) Torre do Jogo da Péla; (c) Troço de cubelo no interior dum edifício na Calçada de Santana; (d) Troço da muralha no jardim do Palácio da Independência e (e) troço da muralha no Condomínio Terraços de Bragança	7
Figura 2.5 - Lanço Ocidental Fluvial no interior do Corpo Santo Hotel: topo de torre (a) e paramento em alvenaria de pedra (b)	7
Figura 2.6 - Lanço Oriental: troços da muralha e cubelo na Escola Básica e Secundária Gil Vicente com paramentos em taipa (a, b)	8
Figura 2.7 - Torre de São Lourenço, no lanço Ocidental da muralha, e que foi demolida	9
Figura 2.8 - Evolução da Torre do Jogo da Péla: (a) em 1948; (b) antes da intervenção urbanística em 2004 e (c) estado atual, em 2018.....	10
Figura 2.9 – Cubelo no lanço Oriental (Escola Básica e Secundária Gil Vicente): em 1949 (a) e em 2018 (b)	11
Figura 2.10 – Arco de Santo André, transformado a partir de antiga porta da muralha	11
Figura 2.11 – Postigo no lanço Ocidental da muralha, no Condomínio Terraços de Bragança	12
Figura 2.12 – Imagens da intervenção arqueológica efetuada em 2006: pormenor da argamassa com presença de nódulos brancos de cal (seta vermelha) (a) parede e escada no interior da torre (b, c) ..	13
Figura 2.13 - Intervenção em 2016 no troço Oriental em S. Vicente de Fora: parede em taipa (a) e pormenor da exposição da parede (b)	14
Figura 2.14 - Intervenção em 2016 no parque de estacionamento da EMEL na Graça: (a) vista do logradouro dos bombeiros com parede de taipa e (b) postigo em alvenaria de pedra regular	15
Figura 2.15 - Intervenção em 2016 no paramento Oeste (Rua da Verónica): base da muralha com evidência de camada de taipa.....	15
Figura 2.16 - Intervenção em 2016 no paramento Oeste (Rua da Verónica): (a) sondagem S1 com substrato rochoso e (b) alargamento do comprimento de sondagem	16
Figura 2.17 - Intervenção em 2016 no paramento Este (Rua da Verónica): (a) sondagem S2 com argamassas de reboco em 2 níveis e (b) abertura das agulhas para montagem original dos taipais ..	17
Figura 2.18 - Intervenção em 2016 no paramento a Norte (Rua da Verónica): (a) sondagem S3 com paramento Norte em taipa e (b) sondagem S4 com abertura de postigo	17
Figura 2.19 - Plano geral da intervenção urbanística realizada em 2007 no Largo do Chafariz de Dentro, em Alfama	18
Figura 2.20 - Intervenção na fachada Nordeste de edifício localizado na Rua do Terreiro do Trigo: (a) localização em planta; (b) 1º piso com adarve da torre e (c) 2º piso com a presença de agulhas	19
Figura 2.21 - Intervenção na fachada Nordeste de edifício localizado na Rua do Terreiro do Trigo: (a) localização em planta, (b) enchimento da muralha e (c) vão de uma porta da muralha	19

Figura 2.22 - Intervenção em 2014 na Rua António Maria Cardoso: (a) presença das agulhas de construção da taipa nas paredes interiores e (b) paramento da muralha visível no logradouro dos edifícios	20
Figura 3.1 - Mapeamento dos vários troços da muralha Fernandina estudados (imagem retirada do <i>Google Earth</i>)	21
Figura 3.2 – Localização (círculo a tracejado) da Torre do Jogo da Péla	22
Figura 3.3 - Torre do Jogo da Péla: em 2019 (a) e (b) em 1948	22
Figura 3.4 - Torre do Jogo da Péla (setas): a) Intervenção da EPUL em 2006; b) Imagem retirada do <i>Google Earth</i> em 2019	23
Figura 3.5 – Extração de carotes na Torre do Jogo da Péla: furo vertical (a) e horizontal (b)	23
Figura 3.6 - Localização do cubelo (círculo a tracejado) designado por 1ª Torre na planta.....	24
Figura 3.7 – Cubelo do Postigo de Santana: (a) em 2013 e (b) em 2018	25
Figura 3.8 – Alçados do cubelo situado em edifício da Calçada de Santana: (a) a Norte e (b) a Sul.....	25
Figura 3.9 – Alçados do cubelo localizado em edifício na Calçada de Santana: (a) a Oeste e (b) a Este. 26	
Figura 3.10 – Localização em planta do Palácio da Independência (seta a negro) e do sector da muralha visitado (retângulo tracejado a vermelho)	27
Figura 3.11 – Palácio da Independência: (a) jardim do palácio; (b) troço inspecionado; (c, d) zonas nos muros evidenciando forte degradação	27
Figura 3.12 – Localização em planta (círculo a tracejado) da Escola e locais de extração de amostras ..	28
Figura 3.13 – Elementos constituintes da muralha na Escola Básica e Secundária Gil Vicente: (a,b) cubelos e (c) “nicho” na muralha de taipa	28
Figura 3.14 – Extração de carotes na Escola Básica e Secundária Gil Vicente: (a) paramento da muralha em taipa e (b) no cubelo.....	29
Figura 3.15 – Localização em planta (círculo a tracejado) do Palácio da Rosa	29
Figura 3.16 – Palácio da Rosa: (a) Entrada principal, (b) fachada virada a Sul, (c, d) vistas da fachada exposta a Oeste	30
Figura 3.17 – Localização em planta (círculo a tracejado) do Corpo Santo Hotel evidenciando a presença da torre João Bretão constituinte do traçado da muralha nesta zona	31
Figura 3.18 – Corpo Santo Hotel: (a) vestígios da muralha da Torre de João Bretão em alvenaria de pedra bem aparelhada e (b) núcleo da Torre de João Bretão	32
Figura 3.19 – Torre de João Bretão: (a) pormenor da instalação da caroteadora (furo vertical) e (b) remoção da carote.....	32
Figura 3.20 - Localização a tracejado do complexo em planta (a); Planta do projeto inicial com evidência a negro dos vestígios arqueológicos a restaurar (b)	33
Figura 3.21 – Muralha e Torre - Condomínio dos Terraços de Bragança: Extração de carotes verticais na torre (a) e horizontais no paramento da muralha em taipa (b)	34
Figura 3.22 - Localização em planta (área a tracejado) do conjunto de edifícios intervencionados na da Rua Terreiro do Trigo (a); perspetiva da Rua Terreiro do Trigo (b); e fachada orientada a Sul (c)	35
Figura 3.23 – Paramentos principais das paredes da muralha: aparelho construtivo de alvenaria de pedra argamassada virada a noroeste (a) nicho da parede amuralhada localizada a NE e vista transversal da parede no piso 1 (c)	35

Figura 3.24 – Localização em planta (zona a tracejado) do local de extração das amostras no Largo da Graça (a); perspetiva atual do local de referência (b); Igreja da Graça junto ao traçado da muralha neste troço	36
Figura 3.25 – Largo da Graça: (a) local junto à Igreja da Graça onde foram recolhidas as amostras de argamassa e de taipa	36
Figura 4.1 – Fases da extração de carotes: carotagem vertical no cubelo da Calçada de Santana (a) e horizontal na Escola Gil Vicente (b)	38
Figura 4.2 – Operação de corte da carote para obtenção dos provetes para ensaios	45
Figura 4.3 – Ensaio de resistência superficial pelo esclerómetro pendular em reboco na Torre do Jogo da Péla	48
Figura 4.4 – Equipamento <i>Martinet-Baronnie</i> (a) e medição do diâmetro com craveira (b)	49
Figura 4.5 – Tubos de Karsten colocados em parede do caso de estudo 1	50
Figura 4.6 – Equipamento de ultrassons (a) e medições realizadas (b)	51
Figura 4.7 – Preparação da fração fina para DRX: (a) desagregação da amostra e (b) amostra por peneirar	52
Figura 4.8 – Preparação da fração global: (a) moagem com moinho de bolas <i>RETSCH S100</i> e (b) com almofariz e pilão com homogeneização da fração global em (c)	52
Figura 4.9 – Difratómetro de raios X Philips PW3710	53
Figura 4.10 - Material utilizado na colocação da amostra (a) e equipamento ATG/dTG/ATD (b)	54
Figura 4.11 – Pesagem dos constituintes (a) aspeto das frações obtidas após ataque ácido (b)	55
Figura 4.12 – Preparação das soluções de ataque (a), agitação e ataque ácido da amostra (b)	56
Figura 4.13 – (a) e (b) Filtragem do resíduo insolúvel em bomba de vácuo	56
Figura 4.14 – Equipamento de agitação de peneiros <i>RETSCH</i> para a separação granulométrica do agregado	57
Figura 4.15 – Equipamento de medição <i>ISOMET 2014</i> (a) e sonda <i>API 210412</i> (b)	58
Figura 4.16 – Ensaio de dureza superficial com durómetro Shore A	59
Figura 4.17 – Ensaio de determinação da massa volúmica: (a) medição da altura; (b) medição do diâmetro e (c) pesagem do provete	60
Figura 4.18 – Equipamento de medição do módulo de elasticidade dinâmico	60
Figura 4.19 – Ajuste geométrico para obtenção do parâmetro <i>b</i> dos provetes	61
Figura 4.20 – Ensaio de absorção capilar: (a) tabuleiro com os provetes de ensaio e (b) pesagem do provete no instante de tempo <i>i</i>	62
Figura 4.21 – Ensaio de secagem	63
Figura 4.22 – Esquema do ensaio de compressão diametral (a); pormenor que mostra as tiras de madeira utilizadas na parte superior e inferior dos provetes (b)	64
Figura 5.1 - Troço de taipa da muralha no caso de estudo 4 (Muralha e Cubelos Escola Básica e Secundária Gil Vicente): (a) aspeto da superfície com desagregação do reboco e (b) identificação de camadas de taipa com diferente coloração e degradação	65
Figura 5.2 - Troço da muralha no Palácio da Rosa (caso de estudo 5): (a) parede inserida num dos pátios do palácio e (b) alvenaria de pedra irregular argamassada	66

Figura 5.3 - Troços da muralha no Terraços de Bragança (caso de estudo 7): (a) paredes principais a Oeste; (b) torre Conde Vimioso; (c) forte exposição da base de fundação da torre; (d) parede principal a Sul; (e) ao fundo, réplica em taipa da muralha e (f) continuidade Este-Oeste da muralha original ...	67
Figura 5.4 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos nas paredes interiores da Torre do Jogo da Péla (caso de estudo 1).....	68
Figura 5.5 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos no paramento da Muralha orientado a Sul no Palácio da Independência (caso de estudo 3).....	69
Figura 5.6 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos em vários locais no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7)	69
Figura 5.7 - Valores da resistência superficial por choque de esfera obtidos nas paredes interiores da Torre do Jogo da Péla (caso de estudo 1)	70
Figura 5.8 - Valores da resistência superficial por choque de esfera obtidos na réplica da muralha em taipa no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7).....	71
Figura 5.9 - Valores de velocidade de propagação de ultrassons obtidos na taipa original e réplica da muralha no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7)	71
Figura 5.10 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na pedra e argamassa de cor cinzenta da alvenaria de pedra argamassada do caso de estudo 3 – Palácio da Independência	73
Figura 5.11 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na argamassa rosada e tijolo de encasque da alvenaria de pedra argamassada do caso de estudo 3 – Palácio da Independência.....	74
Figura 5.12 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na parede de taipa original e réplica no caso de estudo 7 – Condomínio Terraços de Bragança	75
Figura 5.13 – Curvas granulométricas do agregado nos provetes de pedra irregular argamassada.....	81
Figura 5.14 – Curvas granulométricas do agregado nos provetes de taipa	81
Figura 5.15 – Valores da condutibilidade térmica para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular	83
Figura 5.16 – Valores médios da dureza superficial para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular	84
Figura 5.17 – Valores de massa volúmica aparente para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular	85
Figura 5.18 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular	86
Figura 5.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo – provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular.....	88
Figura 5.20 - Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo – provetes de taipa militar	88
Figura 5.21 – Curvas de absorção de água por capilaridade na fase inicial em função da raiz do tempo	89
Figura 5.22 – Valores do coeficiente de capilaridade para provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular e de taipa militar	90
Figura 5.23 – Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1) – provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular	92

Figura 5.24 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS1) – provetes de taipa militar	92
Figura 5.25 – Taxas de secagem nas duas fases do ensaio	93
Figura 5.26 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS2) – provetes de alvenaria de pedra irregular argamassada.....	94
Figura 5.27 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS2) – provetes de alvenaria de taipa militar.....	94
Figura A 1 - Amostra JP_T1 com fragmentos JP_T1.1, JP_T1.2 e JP_T1.3 (a); vista lateral do fragmento JP_T1.2 (b) e face no provete JP_T1.3-1 em contacto com a água (c)	A15
Figura A 2 – Difrátograma para o provete JP_T1.2	A15
Figura A 3 – Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T1.2.....	A16
Figura A 4 – Curva granulométrica do provete JP_T1.2.....	A16
Figura A 5 – Análise granulométrica provete JP_T1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A17
Figura A 6 - Difrátograma para o provete JP_T1.3	A18
Figura A 7 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T1.3	A18
Figura A 8 – Curva granulométrica do provete JP_T1.3.....	A19
Figura A 9 - Análise granulométrica provete JP_T1.3-2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A19
Figura A 10 - Amostra JP_T2 (a) vistas laterais (b e c) e face do provete JP_T2.1 em contacto com a água (d)	A20
Figura A 11 – Amostra JP_T3 (a) vistas laterais (b, c e d)	A20
Figura A 12 – Face do provete JP_T3.1 em contacto com a água (a) e face do provete JP_T3.2 em contacto com a água	A21
Figura A 13 - Difrátograma para o provete JP_T3.3	A22
Figura A 14 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T3.3	A22
Figura A 15 – Curva granulométrica do provete JP_T3.3.....	A23
Figura A 16 - Análise granulométrica provete JP_T3.3: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A23
Figura A 17 – Amostra seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A24
Figura A 18 - Difrátograma para o provete JP_T4	A24
Figura A 19 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T4	A25
Figura A 20 – Curva granulométrica do provete JP_T4.....	A25
Figura A 21 - Análise granulométrica provete JP_T4: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A26

Figura A 22 - Amostra CS_C de vistas laterais seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos (a e b).....	A27
Figura A 23 - Difratoograma para o provete CS_C	A27
Figura A 24 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete CS_C	A28
Figura A 25 - Curva granulométrica do provete CS_C.....	A28
Figura A 26 - Análise granulométrica provete CS_C: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A29
Figura A 27 – Amostra PI_M seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos	A29
Figura A 28 - Difratoograma para o provete PI_M	A30
Figura A 29 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PI_M	A30
Figura A 30 – Curva granulométrica do provete PI_M.....	A31
Figura A 31 - Análise granulométrica provete PI_M: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A31
Figura A 32 - Amostra EGV_M1 (a) amostra com fragmentos EGV_M1.1 e EGV_M1.2 (b e c)	A32
Figura A 33 – Face do provete EGV_M1.1 em contacto com a água.....	A32
Figura A 34 - Difratoograma para o provete EGV_M1.2	A33
Figura A 35 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete EGV_M1.2	A33
Figura A 36 - Curva granulométrica do provete EGV_M1.2	A34
Figura A 37 - Análise granulométrica provete EGV_M1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A34
Figura A 38 – Amostra EGV_M2 (a) face do provete EGV_M2.1 em contacto com a água	A35
Figura A 39 - Difratoograma para o provete EGV_M2.2	A36
Figura A 40 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete EGV_M2.2	A36
Figura A 41 - Curva granulométrica do provete EGV_M2.2	A37
Figura A 42 - Análise granulométrica provete EGV_M2.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A37
Figura A 43 – Amostra PR_M3.1 seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A38
Figura A 44 - Difratoograma para o provete PR_M3.1.....	A38
Figura A 45 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PR_M3.1	A39
Figura A 46 - Curva granulométrica do provete PR_M3.1	A39
Figura A 47 - Análise granulométrica provete PR_M3.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A40
Figura A 48 – Amostra PR_M6 seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A40
Figura A 49 - Difratoograma para o provete PR_M6.1.....	A41
Figura A 50 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PR_M6.1	A41
Figura A 51 - Curva granulométrica do provete PR_M6.1	A42

Figura A 52 - Análise granulométrica provete PR_M6.1: (a) fração 2,36 mm; (b) fração 1,18 mm; (c) fração 600 µm; (d) fração 300 µm; (e) fração 150 µm; (f) fração 75 µm; (g) fração < 75 µm.....	A42
Figura A 53 – Amostra CSH_T1 (a) e face do provete CSH_T1 em contacto com a água.....	A43
Figura A 54 – Amostra CSH_T2 selecionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A44
Figura A 55 - Difrátograma para o provete CSH_T2.1.....	A44
Figura A 56 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete CSH_T2.1.....	A45
Figura A 57 – Curva granulométrica do provete CSH_T2.1.....	A45
Figura A 58 - Análise granulométrica provete CSH_T2.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A46
Figura A 59 – Amostra TB_M1 (a) face do provete TB_M1.1 em contacto com a água (b) e face do provete TB_M1.2 em contacto com a água.....	A46
Figura A 60 - Difrátograma para o provete TB_M1.3.....	A48
Figura A 61 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_M1.3.....	A48
Figura A 62 - Curva granulométrica do provete TB_M1.3.....	A49
Figura A 63 - Análise granulométrica provete TB_M1.3: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A49
Figura A 64 – Amostra TB_M2 (a) face do provete TB_M2.1 (b) provete TB_M2.2 (c) e TB_M2-3 (d) em contacto com a água.....	A50
Figura A 65 - Difrátograma para o provete TB_M2.4.....	A51
Figura A 66 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_M2.4.....	A52
Figura A 67 - Curva granulométrica do provete TB_M2.4.....	A52
Figura A 68 - Análise granulométrica provete TB_M2.4: (a) fração 2,36 mm; (b) fração 1,18 mm; (c) fração 600 µm; (d) fração 300 µm; (e) fração 150 µm; (f) fração 75 µm; (g) fração < 75 µm.....	A53
Figura A 69 – Amostra TB_T1 e fragmentos (a) face do provete TB_T1.1 (b) e do provete TB_T1.2 (c) em contacto com a água.....	A53
Figura A 70 - Difrátograma para o provete TB_T1.2.....	A54
Figura A 71 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_T1.2.....	A55
Figura A 72 - Curva granulométrica do provete TB_T1.2.....	A55
Figura A 73 - Análise granulométrica provete TB_T1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A56
Figura A 74 – Amostra TB_T2 (a) face do provete TB_T2-1 (b) e do provete TB_T2-2 (c) em contacto com a água.....	A57
Figura A 75 – Amostra RTT_T selecionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A58
Figura A 76 - Difrátograma para o provete RTT_T.1.....	A58
Figura A 77 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_T.1.....	A59
Figura A 78 - Curva granulométrica do provete RTT_T.1.....	A59

Figura A 79 - Análise granulométrica provete RTT_T.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A60
Figura A 80 - Amostra RTT_P selecionada para ensaios químicos e mineralógicos	A60
Figura A 81 - Difrátograma para o provete RTT_P.1	A61
Figura A 82 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_P.1	A61
Figura A 83 – Curva granulométrica do provete RTT_P.1	A62
Figura A 84 - Análise granulométrica provete RTT_P.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A62
Figura A 85 - Amostra RTT_M seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A63
Figura A 86 - Difrátograma para o provete RTT_M.1.....	A63
Figura A 87 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_M.1	A64
Figura A 88 - Curva granulométrica do provete RTT_M.1	A64
Figura A 89 - Análise granulométrica provete RTT_M.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A65
Figura A 90 - Amostra LG_M selecionada para ensaios químicos e mineralógicos.....	A65
Figura A 91 - Difrátograma para o provete LG_M.....	A66
Figura A 92 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete LG_M	A66
Figura A 93 – Curva granulométrica do provete LG_M	A67
Figura A 94 - Análise granulométrica provete LG_M: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm.....	A67
Figura A 95 – Curvas granulométricas dos provetes seleccionados para os ensaios mineralógicos e químicos	A78

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comprimento total da muralha Fernandina de Lisboa	8
Tabela 2.2 - Área total da cidade incorporada pela muralha Fernandina de Lisboa	8
Tabela 4.1 – Análise visual das amostras recolhidas	39
Tabela 4.2 – Organização dos provetes por tipo de ensaio.....	46
Tabela 4.3 – Ensaio <i>in situ</i> realizados por caso de estudo	47
Tabela 4.4 – Classificação da resistência mecânica superficial através do esclerómetro pendular modelo <i>Schmidt PT</i>	48
Tabela 4.5 – Série ASTM de peneiros utilizada para a separação granulométrica	57
Tabela 4.6 – Características da sonda de superfície utilizada na medição dos valores de condutibilidade térmica	58
Tabela 5.1 – Síntese de valores da velocidade de propagação de ultrassons obtidos por outros autores em amostras de taipa e adobe	72
Tabela 5.2 - Composição mineralógica qualitativa dos provetes de argamassa de alvenaria de pedra calcária irregular	76
Tabela 5.3 - Composição mineralógica qualitativa dos provetes de taipa	77
Tabela 5.4 - Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes de argamassa de pedra irregular calcária	78
Tabela 5.5 - Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes de taipa.....	79
Tabela 5.6 – Teor de resíduo insolúvel em ácido e de agregado total nos provetes de argamassa de pedra irregular calcária	79
Tabela 5.7 – Teor de resíduo insolúvel em ácido e de agregado total nos provetes de taipa	80
Tabela 5.8 - Composição e traço dos provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular calcária (% em massa)	82
Tabela 5.9 - Composição e traço dos provetes de taipa (% em massa)	82
Tabela 5.10 – Valores individuais da massa volúmica aparente, e média e desvio padrão entre provetes do mesmo caso de estudo	86
Tabela 5.11 – Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade	90
Tabela 5.12 – Valores individuais e médios das taxas de secagem.....	93
Tabela 5.13 – Força máxima de compressão diametral e tensão de tração σ_{ts}	95
Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas	A3
Tabela A 2 – Marcação das carotes com identificação dos provetes para ensaio (linhas tracejadas)	A8
Tabela A 3 – Resultados, em graus Vickers, da resistência superficial por esclerómetro pendular para o caso de estudo 1 – Torre jogo da Péla	A9
Tabela A 4 - Resultados, em Vickers, da resistência superficial pelo esclerómetro superficial para caso de estudo 3 – Palácio da Independência	A9
Tabela A 5 - Resultados, em Vickers, da resistência superficial pelo esclerómetro superficial caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança.....	A10

Tabela A 6 - Resultados, em mm, do diâmetro da concavidade da esfera no caso de estudo 1 – Torre do Jogo da Péla.....	A11
Tabela A 7 - Resultados, em mm, do diâmetro da concavidade da esfera no caso de estudo 7 – Terraços de Bragança	A11
Tabela A 8 – Resultados da quantidade de água absorvida no instante de tempo i para o caso de estudo 3 – Palácio da Independência	A12
Tabela A 9 - Resultados da quantidade de água absorvida no instante de tempo i para o caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança	A12
Tabela A 10 – Resultados, em m/s, da velocidade de propagação por ultrassons no caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança.....	A13
Tabela A 11 – Resultados, em Shore A, da resistência superficial através do durómetro	A69
Tabela A 12 – Resultados, em W/(m.K), da condutibilidade térmica	A70
Tabela A 13 – Resultados, em kg/m ³ , da massa volúmica aparente.....	A71
Tabela A 14 – Resultados, em MPa, do módulo de elasticidade dinâmico	A72
Tabela A 15 – Resultados, em %, do resíduo insolúvel para cada provete analisado	A73
Tabela A 16 – Resultados da análise granulométrica dos agregados de cada provete.....	A75

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Institucionais e entidades

ASTM – American Society for Testing and Materials
BSI – British Standards Institution
CAL – Centro de Arqueologia de Lisboa
CEN – Comité Européenne de Normalisation
CML – Câmara Municipal de Lisboa
DBC – Departamento dos Bens Culturais
DEC – Departamento de Engenharia Civil
DEPOF – Departamento de Estudos, Projetos, Obras e Fiscalização
DGPC – Direcção-Geral do Património Cultural
DIN – Deutsches Institut für Normung
DM – Departamento de Materiais
DSPAA - Divisão de Salvaguarda do Património Arquitectónico e Arqueológico
EMEL – Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa
EN – European Norm
EPUL – Empresa Pública de Urbanismo de Lisboa
FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia
FE – Ficha de Ensaio
IPQ – Instituto Português da Qualidade
LabCON – Laboratórios de Construção
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NMM – Núcleo de Materiais Metálicos
NP – Norma Portuguesa
PDM – Plano Diretor Municipal
NOVA – Universidade Nova de Lisboa

Ensaio e determinações

ATD – Análise térmica diferencial
ATG – Análise termogravimétrica
C_c – Coeficiente de capilaridade
DRX – Difração dos raios X
dTG – Análise termogravimétrica diferencial
E_d – Módulo de elasticidade dinâmico
HR – Humidade Relativa
Q_i – Quantidade de água absorvida no instante de tempo i
R_c – Resistência à compressão

RI – Resíduo insolúvel

T – Temperatura

T_{s1} – Taxa de secagem da primeira fase

T_{s2} – Taxa de secagem da segunda fase

Wi – Quantidade de água absorvida a baixa pressão no instante de tempo *i*

λ - Condutibilidade térmica

ρ – Massa volúmica aparente

σ_{ts} – Tensão de tração

Identificação de casos de estudo, elementos da muralha e amostras

Terminologia utilizada:

C – cubelo; **T** – torre; **M** – muralha; **P** – postigo

JP – Jogo da *Péla*; **CS** – Calçada de Santana; **PI** – Palácio da Independência; **EGV** – Escola Gil Vicente; **PR** – Palácio da Rosa; **CSH** – Corpo Santo Hotel; **TB** – Terraços de Bragança; **RTT** – Rua Terreiro do Trigo; **LG** – Largo da Graça

CS_C – Amostra do caso de estudo da Calçada de Santana 131-137, cubelo, carote

CSH_T1 – Amostra do caso de estudo do Corpo Santo Hotel, torre, carote 1

CSH_T2 – Amostra do caso de estudo do Corpo Santo Hotel, torre, carote 2

EGV_M1 – Amostra do caso de estudo da Escola Gil Vicente, muralha, carote 1

EGV_M2 – Amostra do caso de estudo da Escola Gil Vicente, muralha, carote 2

JP_T1 – Amostra do caso de estudo do Jogo da *Péla*, torre, carote 1

JP_T2 – Amostra do caso de estudo do Jogo da *Péla*, torre, carote 2

JP_T3 – Amostra do caso de estudo do Jogo da *Péla*, torre, carote 3

JP_T4 – Amostra do caso de estudo do Jogo da *Péla*, torre, fragmento 4

LG_M – Amostra do caso de estudo do Largo da Graça, muralha

PI_M – Amostra do caso de estudo do Palácio da Independência, muralha

PR_M3 – Amostra do caso de estudo do Palácio da Independência, muralha, fragmento 3

PR_M6 – Amostra do caso de estudo do Palácio da Independência, muralha, fragmento 6

RTT_T – Amostra do caso de estudo da Rua Terreiro do Trigo 6-26, torre

RTT_P – Amostra do caso de estudo da Rua Terreiro do Trigo 6-26, postigo

RTT_M – Amostra do caso de estudo da Rua Terreiro do Trigo 6-26, muralha

TB_M1 – Amostra do caso de estudo dos Terraços de Bragança, muralha, carote 1

TB_M2 – Amostra do caso de estudo dos Terraços de Bragança, muralha, carote 2

TB_T1 – Amostra do caso de estudo dos Terraços de Bragança, torre, carote 1

TB_T2 – Amostra do caso de estudo dos Terraços de Bragança, torre, carote 2

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A necessidade de conservação e preservação do património arquitetónico e arqueológico em Portugal tem motivado um interesse crescente por parte de entidades públicas e privadas, o que também tem motivado um aumento no número de pedidos de caracterização material, e concomitantemente a avaliação do estado de conservação dos materiais e das estruturas constituintes desse património.

No território português, desde a pré-história que a terra é um dos principais materiais utilizado nas variadas técnicas construtivas (Bruno et. al, 2010). De entre elas, a taipa destaca-se maioritariamente no Centro e a Sul do país (Correia, 2010). Esta técnica produzida de forma tradicional resulta sobretudo na deposição sucessiva de terra humedecida depois de ser escavada e desterrada, em camadas colocadas entre taipais (cofragens) de madeira, que são sucessivamente compactadas manualmente, reduzindo a espessura de cada camada, até preenchimento completo do taipal. Os taipais são removidos imediatamente após o seu preenchimento e montados para preenchimento do bloco de taipa adjacente (no mesmo nível e, quando este concluído, no nível acima). Para além da taipa poder constituir toda a espessura da parede, a utilização de terra como matéria-prima na construção de monumentos históricos pode ainda encontrar-se no preenchimento do núcleo central das suas espessas paredes, entre panos exteriores de alvenaria de pedra aparelhada (Faria e Henriques, 2006; Vieira da Silva, 1987). Todos estes tipos de paredes requerem estudos de caracterização e comportamento estrutural, para os quais a análise da sua constituição e caracterização material é necessária. Historicamente sabe-se que geralmente os materiais utilizados eram obtidos em localização próxima da construção, mas, no entanto, existem casos em que eram provenientes de outros lugares, como por exemplo quando eram utilizadas pedras que vinham como lastro em embarcações. No caso da utilização da terra como único material constituinte, este tema tem crescido essencialmente graças ao interesse em conservar os monumentos de arquitetura de terra fazendo-lhes intervenções sucessivas de modo a reestabelecer a sua originalidade (Mileto et. al, 2018).

Importa referir ainda a cal aérea, o outro ligante, que a par da terra tem grande expressão no património arquitetónico e arqueológico em Portugal.

A grande falta de informação detalhada acerca dos materiais e tecnologias de construção sobre estruturas amuralhadas antigas é um dos principais obstáculos no decorrer das intervenções. De modo a que as intervenções futuras tenham o desempenho esperado, é necessário previamente caracterizar os materiais constituintes para que a compatibilidade entre os materiais antigos e os de reparação/substituição possa ser a mais eficiente possível.

A presente dissertação de mestrado está inserida no âmbito do projeto DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial (PTDC/EPH-PAT/4684/2014) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, coordenado pelo LNEC (W5).

1.2 Objetivos e metodologia

A presente dissertação procura através da bibliografia analisada, da caracterização físico-mecânica realizada *in situ* e da caracterização química, mineralógica, física e mecânica de amostras de argamassa e de taipa recolhidas em vários elementos e secções da muralha Fernandina de Lisboa, dar a conhecer informação sobre as características dos materiais amostrados e contribuir assim para uma melhor fundamentação das futuras intervenções.

É também objetivo do presente trabalho reportar algumas das intervenções de que a muralha Fernandina foi alvo, nomeadamente através do registo visual e documental dos materiais que constituem a estrutura e, também através das ações executadas nas inspeções contribuir, fundamentar e compilar a informação existente, com o objetivo da preservação deste tipo de monumentos.

A muralha Fernandina de Lisboa constitui um dos diversos casos de estudo inseridos no projeto DB-HERITAGE o qual gere uma base de dados com a informação sobre materiais de construção com valor histórico e patrimonial, onde se inclui os empregues neste tipo de construções, sendo o seu contributo fundamental para o apoio em novas intervenções e na utilização de materiais e técnicas mais compatíveis com os preexistentes.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação está repartida em seis capítulos apresentando-se no final as referências bibliográficas e os anexos, sendo explicados resumidamente nos parágrafos seguintes. Capítulo 1 – Constitui a introdução, na qual é referido o enquadramento do tema, os objetivos e metodologia adotada para a sua execução e a estrutura organizacional do documento. Capítulo 2 – Consiste na análise ao estado dos conhecimentos; a nível histórico é feita uma análise sucinta das estruturas de defesa da cidade de Lisboa e caracterizada a muralha Fernandina, apresentando-se uma descrição de algumas das intervenções realizadas em diversos troços da muralha até aos dias de hoje. Capítulo 3 – Apresenta os nove locais visitados e inspecionados (que são designados por casos de estudo), fazendo-se uma caracterização geral individualmente para cada um com a descrição dos aspetos mais relevantes, como a sua localização, a análise e caracterização visual e oral, bem como a amostragem efetuada em cada caso de estudo. Capítulo 4 – É o capítulo centrado na campanha experimental; descreve a recolha de amostras *in situ*, a identificação e preparação das diferentes amostras (carotes e fragmentos) para os diversos ensaios a realizar. São descritos todos os procedimentos adotados para cada um dos ensaios realizados para as diferentes técnicas experimentais. Capítulo 5 – Neste capítulo são apresentados os resultados finais obtidos nos diversos ensaios efetuados durante a campanha experimental. Os valores são comparados entre si e, em alguns casos, com resultados de outros autores. Capítulo 6 – Corresponde ao último capítulo da dissertação onde é apresentada uma síntese das principais conclusões retiradas. São apresentados alguns desenvolvimentos para trabalhos futuros com o intuito de assegurar intervenções futuras na muralha mais sustentáveis. Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas consultadas e os anexos. Nos anexos são expressos, detalhadamente, os resultados individuais da análise visual das amostras e dos diferentes tipos de ensaios realizados.

2 A muralha Fernandina de Lisboa

2.1 A defesa da cidade de Lisboa

A cidade medieval de Lisboa no século XIV era vista como a grande “capital” do continente europeu dada a sua importante localização geográfica e outros fatores, como o crescente aumento do interesse político da posse da cidade por parte do reino de Castela que, estrategicamente, queria assumir o mais rapidamente o seu comando. Sempre sujeita a ataques provenientes dos castelhanos, a cidade foi sujeita a dois cercos, em 1373 e 1384, em que a sua conquista era um importante objetivo a atingir embora muito difícil de concretizar face à bravura e estoicidade dos habitantes da cidade relativamente ao inimigo.

Desde a conquista de Lisboa em 1147 por parte de D. Afonso Henriques que não ocorriam este tipo de situações. Em 1373 ocorre o primeiro episódio militar, onde os castelhanos invadem a cidade de Lisboa chegando pelos arrabaldes e através do rio Tejo. Foram quatro semanas de cerco, não sendo descritos historicamente quaisquer episódios merecedores de destaque, uma vez que as ações eram maioritariamente de desgaste e exploração da cidade, não causando grandes consequências a nível de perdas, mas sim de tentar perceber e avaliar a capacidade de defesa militar de Lisboa através das zonas mais frágeis das muralhas que a rodeavam (Martins, 2001).

As estruturas de defesa de Lisboa, maioritariamente amuralhadas, constituíam numa primeira instância uma cintura em redor da zona mais populosa da cidade. Não havendo certeza quanto ao período concreto da sua construção, o final do século III é apontado como a época em que foram erguidas as primeiras edificações do género. A Cerca Moura (Figura 2.1a) constituía a bolsa central da cidade amuralhada, mas, dada a instabilidade militar e o crescimento contínuo da cidade, foi considerado serem necessárias medidas de implementação rápidas para assegurar a sua defesa. Assim, nos finais do século XIII, uma nova muralha foi construída para proteção da parte com maior riqueza económica da cidade - a zona junto ao rio Tejo - dos ataques provenientes dos piratas. Esta muralha, designada por muralha de D. Dinis (Figura 2.1b) foi construída em 1294, mas cedo perdeu as suas funções já que a construção de casas, encostadas aos seus panos de alvenaria de pedra, era uma situação crescente. Posto isto, no século XIII, a cidade de Lisboa encontrava-se então protegida por duas principais estruturas defensivas: a Cerca Moura e a Muralha de D. Dinis (para além das muralhas do castelo) (Martins, 2001).

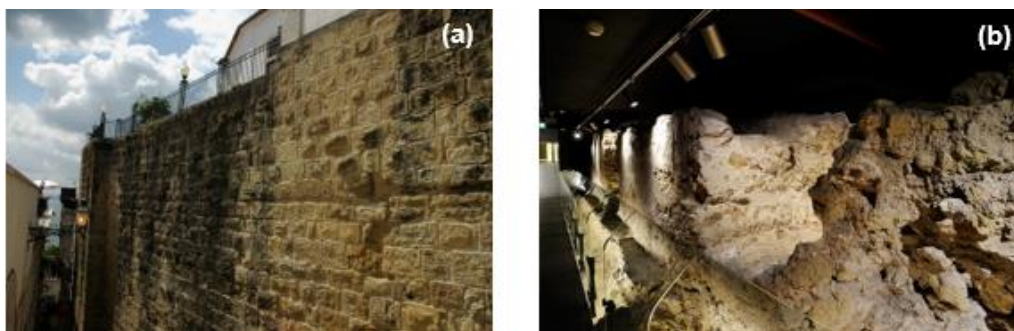


Figura 2.1 – Troços da Cerca Moura localizada em Alfama (a) e da muralha de D. Dinis localizada no edifício do Museu do Dinheiro (b) (W1; W2)

A Cerca Moura rodeava a parte central da cidade de Lisboa, partindo de um troço junto ao rio, a Sul, com 460 metros de comprimento, dois troços - um com 350 metros e outro com 440 metros - a Este e a Oeste com paredes com espessura de 2,5 m. Já a muralha de D. Dinis compreendia um único troço com 700 metros de extensão ao longo da frente ribeirinha do rio (Martins, 2001) .

Estas estruturas passaram a ser descuradas em virtude dos poucos ataques de piratas a que a cidade foi sujeita num determinado período de tempo, chegando até ao ponto de certos troços, neste caso da Cerca Moura, caírem (Lopes, 1975). Para resolver este problema, o concelho de Lisboa emitia um orçamento destinado à reparação das muralhas da cidade. Esta ação não foi suficiente contra um possível ataque em grande escala, que veio a acontecer em 1373 quando as tropas castelhanas chegaram a Lisboa e se depararam com uma cidade praticamente “despida” de uma cintura amuralhada, cercando-a e pilhando-a. Em Dezembro de 1369 e face aos efeitos devastadores do primeiro cerco, o rei D. Fernando fez um plano das necessidades humanas, materiais e financeiras para a construção de uma nova cinta de muralhas (Campos, 1985). A ideia só foi posta em prática em setembro de 1373 quando se inicia a construção da muralha Fernandina, designada por Cerca Nova (por oposição à cerca Moura). Contando com a ajuda da própria população de Lisboa e outra oriunda de localidades dos arredores, foram também mobilizados presos por delitos e prisioneiros de guerra. Estas medidas auxiliaram as populações no seu sustento, reduzindo de certa forma a pobreza em certas zonas da cidade. O primeiro troço a ser erguido foi o do lado Este em consequência da pobreza que se fazia sentir nessa zona (Martins, 2001).

A muralha Fernandina de Lisboa, descrita ao pormenor na secção seguinte, apresentava-se com as características típicas de estruturas de defesa militar, com imponentes torres e espessas paredes, fazendo desta forma a defesa de uma cidade que há muito era assediada pelos reinos mais poderosos.

2.2 Descrição geral da muralha Fernandina de Lisboa

A muralha Fernandina de Lisboa, também designada por Cerca Fernandina ou, como já referido antes, por Cerca Nova, surge na necessidade de garantir a defesa da cidade devido ao seu intenso e contínuo crescimento, na medida em que a Cerca Moura ou Cerca Velha, também assim denominada, já não servia a cidade no papel de assegurar a proteção dos bairros históricos e comerciais que a compunham.

Erguida durante o reinado de D. Fernando, na segunda metade do século XIV, tal como já referido a construção da muralha teve início no ano de 1373, sendo concluída no ano de 1375. No entanto, há documentação que indica a conclusão da construção de um dos muros que constituem a muralha no ano de 1378, pelo que a data da sua conclusão pode considerar-se discutível (Vieira da Silva, 1987a; Oliveira, 1887).

Embora desconhecida por muitos, a muralha Fernandina está presente e evidenciada em diversas partes da cidade de Lisboa, bem como no seu quotidiano, dadas as suas características geométricas de grande envergadura que fazem dela um componente importante no conhecimento arquitetónico e histórico da cidade (Feliciano e Leite, 2010).

A estrutura foi reconhecida e classificada como monumento nacional em 1910 com o Nº de IPA PT031106120023 por Decreto do Diário do Governo na publicação Nº. 136/1910, Série I de 23-06-1910

emitido pelo Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria com a designação de Castelo de São Jorge e Restos das Cercas de Lisboa.

2.3 Traçado e composição da muralha

Simultaneamente ao acentuado crescimento da cidade, como referido na secção 2.1, o traçado da muralha desenvolvia-se acompanhando esse denso crescimento que se fazia constituir dos vários territórios que se iam anexando em redor da cidade de Lisboa. Segundo a bibliografia analisada, estes territórios eram formados a Oeste pelo “arrabalde” que se designa e conhece atualmente pela zona da baixa de Lisboa, com extensões para o Monte de Santana para Norte e Montes de São Roque e São Francisco para Oeste. Do lado Este o traçado da muralha seguia pelo bairro histórico de Alfama com extensões a Norte para o Monte da Graça e a Este para Santa Clara (Vieira da Silva, 1987a). Desta forma a muralha encontra-se dividida em quatro troços ou lanços principais: o lanço Ocidental, o lanço Oriental e os lanços Marginais ou Fluviais. Estes lanços principais (Figura 2.2) definiam-se em duas grandes bolsas (assinalado a traço preenchido) que circundavam as já existentes muralhas antigas (a tracejado): a Cerca Moura, que representa a bolsa central na Figura 2.2, e as muralhas do Castelo de São Jorge, mais evidentes na Figura 2.3. Considera-se então que a muralha está definida a Oeste pelo lanço Ocidental e a Este pelo lanço Oriental, respetivamente. A Norte o traçado da muralha está contido em parte nos lanços Ocidental e Oriental e a Sul fazem parte os lanços Marginais ou Fluviais (Oriental e Ocidental).

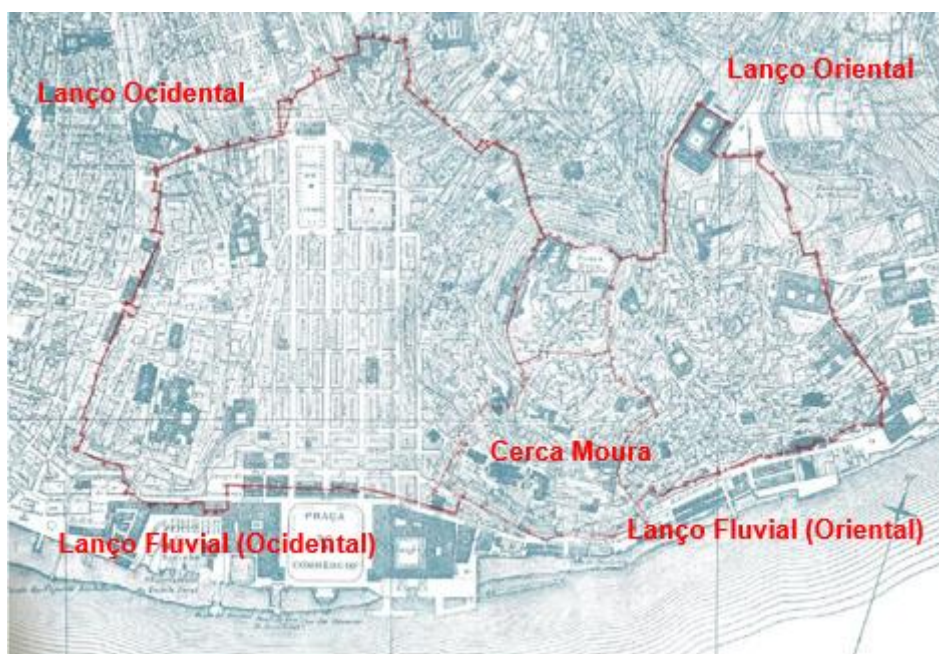


Figura 2.2 - Traçado principal e limites da muralha Fernandina de Lisboa levantados nos anos de 1856/58 (adaptado de Vieira da Silva, 1987a)



Figura 2.3 – Mapa do traçado das muralhas de Lisboa (Casanova, 1892)

O lanço Ocidental (Figura 2.4) com cerca de 2,05 km de extensão e situado na parte Oeste, iniciava-se junto ao Castelo de São Jorge, descendo o vale de outro grande bairro histórico da cidade, a Mouraria, passando pelo Palácio da Rosa, que será referido no capítulo seguinte, e atravessava a atual praça do Martim Moniz (Ferro, 2017). Daqui subia junto da Calçada do Jogo da Péla onde se encontra uma torre, com o mesmo nome, também esta analisada e caracterizada na secção seguinte.

Este lanço seguiria pela Colina de Santana, onde se encontra um dos edifícios que constitui um dos casos de estudo desta dissertação, passando perto de uma das principais entradas para a cidade no século XIV, as portas de Santo Antão, junto ao atual Palácio da Independência, outro caso de estudo, até se cruzar com a Avenida da Liberdade e chegar ao Largo de São Roque, passando pelo Largo do Camões e descendo da Rua do Alecrim, junto ao condomínio dos Terraços de Bragança (outro caso de estudo), até ao Largo do Corpo Santo (também outro caso de estudo). Deste ponto, onde se encontra atualmente o Corpo Santo Hotel, até se chegar junto do Rio Tejo e caminhando para Este iniciava-se o denominado lanço Fluvial Ocidental (Figura 2.5), com cerca de 0,72 km, que percorreria a Rua do Arsenal passando pela Praça do Comércio até se “encontrar” numa embocadura com a Cerca Moura (Vieira da Silva, 1987a).

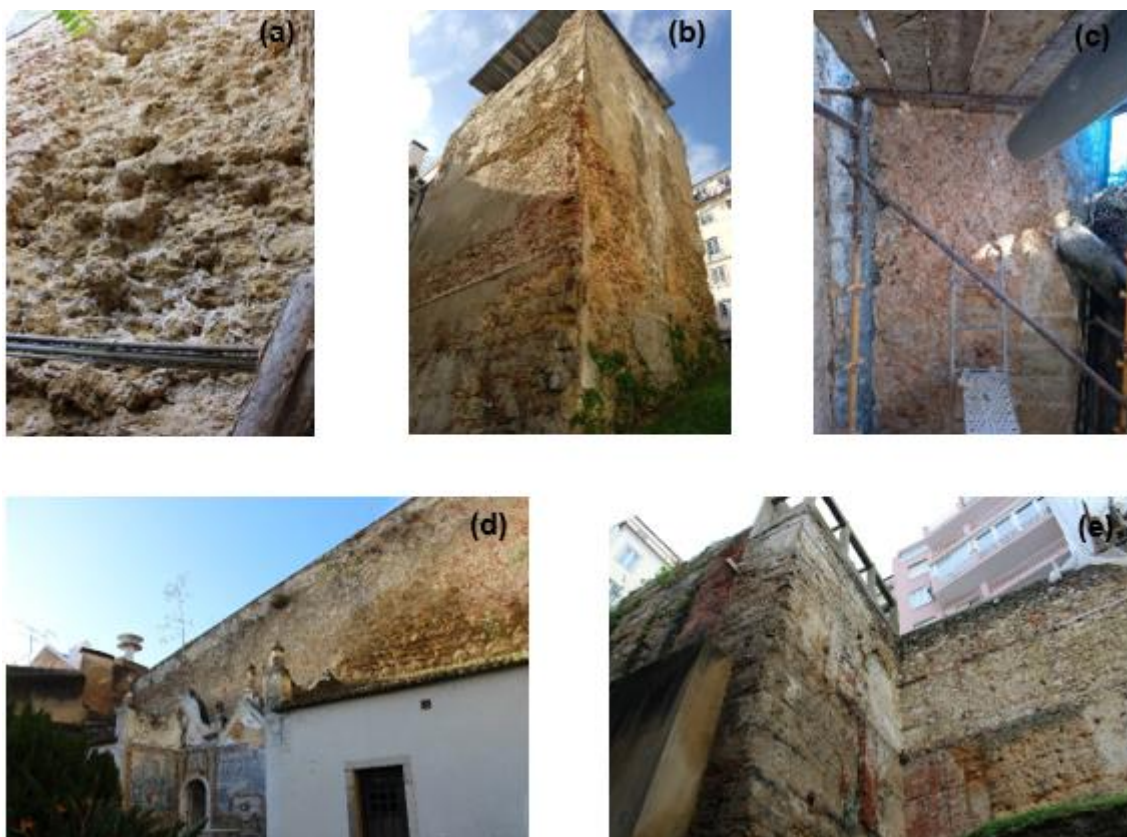


Figura 2.4 - Lanço Ocidental: (a) troço da muralha no Palácio da Rosa; (b) Torre do Jogo da Péla; (c) Troço de cubelo no interior dum edifício na Calçada de Santana; (d) Troço da muralha no jardim do Palácio da Independência e (e) troço da muralha no Condomínio Terraços de Bragança

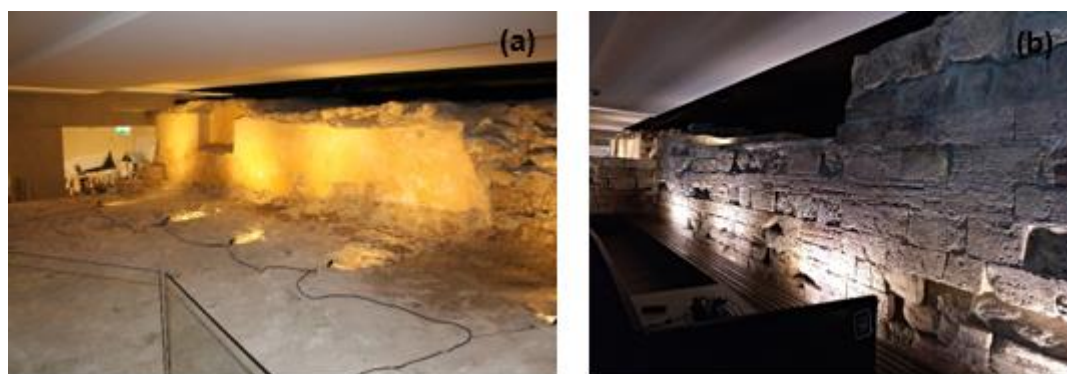


Figura 2.5 - Lanço Ocidental Fluvial no interior do Corpo Santo Hotel: topo de torre (a) e paramento em alvenaria de pedra (b)

Do outro lado da cidade, na zona Este, encontrava-se o lanço Oriental (Figura 2.6) que foi o primeiro a ser construído como referido anteriormente. Este lanço iniciava-se, tal como o lanço Ocidental, no Castelo de São Jorge, descendo pela sua encosta e subindo o monte da Graça até ao Miradouro do Largo da Graça e voltando a descer em direção ao Rio Tejo, atravessando toda esta parte Oriental da cidade. Ainda hoje é possível observar nessa zona Oriental, junto à Escola Secundária e Básica Gil Vicente, um dos troços mais bem conservados. O traçado deste lanço seguia até ao Museu do Exército e fazia um ângulo de 90° para Oeste, onde começava o lanço Fluvial Oriental ao longo da margem do rio até cruzar com a Cerca Moura na zona de Alfama (Vieira da Silva, 1987a; Ferro, 2017).

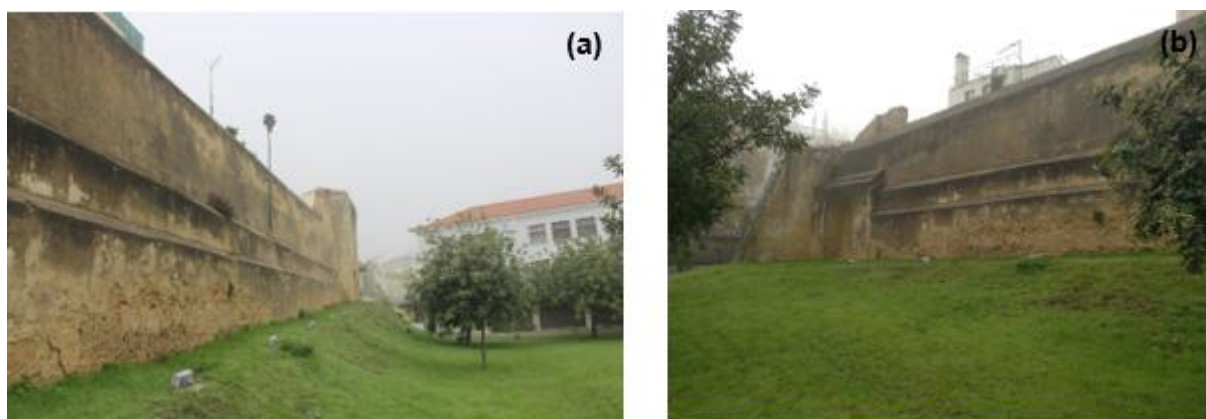


Figura 2.6 - Lanço Oriental: troços da muralha e cubelo na Escola Básica e Secundária Gil Vicente com paramentos em taipa (a, b)

De acordo com Vieira da Silva (1987a), o lanço Oriental tinha um comprimento de 1,38 km de extensão, enquanto o Fluvial Oriental media cerca de 0,54 km (Tabela 2.1).

O comprimento total da muralha englobava uma grande parte da área anexada à cidade (Tabela 2.2) após o fim da sua construção. Esta área abrangia grande parte da cidade formando uma área nova de 6,6 vezes maior do que a área da cidade amuralhada antiga, antes da construção da muralha (Vieira da Silva, 1987a).

Tabela 2.1 - Comprimento total da muralha Fernandina de Lisboa

Lanço da muralha	Comprimento [km]
Ocidental	2,05
Ocidental Fluvial	0,72
Oriental	1,38
Oriental Fluvial	0,54
Extensão total: 4,69	

Tabela 2.2 - Área total da cidade incorporada pela muralha Fernandina de Lisboa

Zona da cidade Lisboa incorporada	Área	
	[km ²]	[ha]
Oeste	0,6127	61,27
Este	0,2665	26,65
Total	0,8792	87,92

Geometricamente, a muralha Fernandina de Lisboa era composta por vários elementos que se coordenavam com os vários lanços de toda a estrutura muralhada. De entre esses elementos destacam-se sobretudo as imponentes torres e cubelos, bem como portas, usualmente utilizadas para a serventia de entradas e saídas da cidade e, embora com menor importância, os postigos que tinham maioritariamente funções de segurança e controlo nas diversas faixas da muralha.

É muito escassa a informação sobre o tipo de construção e os materiais constituintes da muralha. De acordo com Vieira da Silva (1987a) foi utilizada alvenaria maciça, mas em determinados troços apresentavam-se dois muros paralelos de alvenaria ou pedra aparelhada com cerca de 0,5 m de largura preenchidos por taipa perfazendo uma espessura total entre 1,75 e 2,00 m. As dimensões em termos de altura eram variáveis consoante o elemento em questão, sendo os 8 m a medida mais comum e os 15 m nas torres a altura máxima (Vieira da Silva, 1987a).

Nas secções seguintes são apresentadas, resumidamente, cada uma das estruturas que compunham a muralha Fernandina de Lisboa.

2.3.1 Torres

As torres são um dos principais elementos constituintes da muralha. Assumindo um papel fundamental na defesa da cidade, existiram cerca de 76 torres segundo Vieira da Silva (1987a), e estas eram elementos robustos que ultrapassavam, na maioria dos casos, a altura e largura dos muros contíguos da muralha.

Localizadas em pontos fixos e estratégicos de modo a assegurar a defesa da cidade, as torres maiores eram regra geral maciças, porém no lanço Oriental ao longo do rio existiriam algumas ocas sendo as restantes também deste tipo. Constituídas por um enorme volume de alvenaria, nas secções seguintes serão analisados mais em particular o seu tipo de alvenaria e outros materiais constituintes que fazem parte destes elementos. No topo das torres o espaço era aproveitado para servir de terraços ou eirados e estes eram guarnecidos de ameias; porém alguns destes elementos terão já sido acrescentados durante as intervenções do Estado Novo (Figura 2.7).

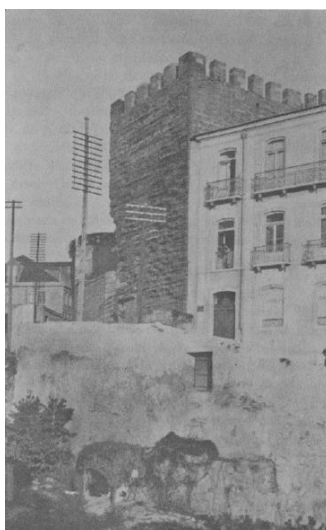


Figura 2.7 - Torre de São Lourenço, no lanço Ocidental da muralha, e que foi demolida (Portugal, 1948)

As dimensões das torres variavam consoante a sua localização, estando as maiores nas zonas de saliências da muralha, podendo atingir até os 15 m de altura (tal como referido anteriormente) e 8 m x 8 m de área de implantação.

Atualmente a maioria das torres já não estão completamente inteiras encontrando-se muitas delas incorporadas em edificações – algumas são identificadas durante obras de reabilitação - ou completamente isoladas, como é o caso da Torre do Jogo da Péla (Figura 2.8), que representa o único exemplar desta natureza e que conserva e preserva algumas das suas características originais (Leitão, 2014).



Figura 2.8 - Evolução da Torre do Jogo da Péla: (a) em 1948 (Portugal, 1948); (b) antes da intervenção urbanística em 2004 (Leitão, 2014) e (c) estado atual, em 2018

2.3.2 Cubelos

Os cubelos, para se ter uma melhor percepção deste tipo construção, eram torres mais pequenas comparativamente às dimensões habituais das torres. Tinham aproximadamente 5 m x 5 m de área de implantação e altura igual à das quadrelas ou troços de muralha entre as torres (com comprimentos variáveis), ou seja, não transpunham a altura dos muros que constituíam a muralha (Ferro, 2017). A composição destes elementos, segundo Vieira da Silva (1987a), era inteiramente maciça face à espessura das paredes principais da muralha.

Com apenas três paramentos salientes e à vista, os cubelos ficavam unidos à muralha por um dos paramentos (Vale, 2018) e tinham como função fortalecer a ligação entres os diferentes segmentos ou troços da muralha (Feliciano e Leite, 2010). Atualmente é possível encontrar alguns destes elementos (Figura 2.9) no que resta da muralha, principalmente no troço Oriental e também, tal como acontece com as torres, podem-se encontrar alguns integrados em prédios e/ou outras edificações.



Figura 2.9 – Cubelo no lanço Oriental (Escola Básica e Secundária Gil Vicente): em 1949 (a) e em 2018 (b)

2.3.3 Portas

Outro dos elementos mais importantes na caracterização da muralha Fernandina de Lisboa, as portas, constituíam o principal eixo de ligação entre entradas e saídas na cidade de Lisboa. Eram as designadas “serventias” que constituíam vãos de abertura de grandes dimensões, bastante robustos e fortificados. Muitas destas portas eram compostas por uma “quadra” ou recinto retangular amuralhado com um ou dois vãos abertos tanto na parte da frente como na retaguarda, sendo o da frente guarnecido nas laterais por duas torres para defesa. No total existiam cerca de 35 portas, incluindo algumas das muralhas do castelo de São Jorge e outras da Cerca Moura, segundo (Vieira da Silva, 1987a) embora outros autores refiram números diferentes.

Curiosamente a identificação das portas era feita com base na religião (igreja, convento ou imagem de carácter religioso) e mais tarde, como ilustrado na Figura 2.10, muitas destas entradas foram demolidas e transformadas em arcos, muitas das vezes por motivos de dificuldades de circulação e acessibilidade à cidade (Vieira da Silva, 1987a).



Figura 2.10 – Arco de Santo André, transformado a partir de antiga porta da muralha (Ferro, 2017)

2.3.4 Postigos

Os postigos, de menor importância, consistiam em aberturas com dimensões reduzidas, fixadas em vãos simples estrategicamente localizados junto de uma ou duas torres ou entre dois cubelos. Davam acesso à entrada da cidade mas, face às portas, facilitavam no controlo e segurança (Vieira da Silva, 1987a). Nem todos os postigos foram construídos aquando da construção da estrutura amuralhada; muitos deles, ainda hoje visíveis (Figura 2.11), foram abertos posteriormente à finalização da construção da muralha.



Figura 2.11 – Postigo no lanço Ocidental da muralha, no Condomínio Terraços de Bragança

2.4 Intervenções realizadas na muralha Fernandina de Lisboa

O acentuado e elevado crescimento da reabilitação do edificado no centro urbano e histórico da cidade de Lisboa tem sido cada vez mais notório. Em todas as construções em que se verifica este tipo de trabalhos, e onde se encontrem estruturas arqueológicas como a muralha Fernandina de Lisboa, são necessárias intervenções que requerem um maior rigor e conhecimento técnico, de maneira a que os materiais e técnicas utilizadas nessas mesmas intervenções não roubem a identidade e originalidade da estrutura encontrada. Contudo, a maior parte das intervenções onde surge o aparecimento de vestígios da muralha incluem apenas trabalhos de levantamento arqueológico, não sendo geralmente possível avançar para a parte da caracterização material, a qual possibilitaria ter um conhecimento mais aprofundado sobre as suas características e o seu estado de conservação.

Atualmente têm surgido diversas obras, de diferentes tipos, em que a muralha Fernandina de Lisboa foi e está a ser alvo de intervenções que estão documentadas e registadas. Estas obras encontram-se localizadas em diversos pontos da cidade, comprovando a utilização de materiais e técnicas diferentes de construção em diferentes localizações.

Presume-se que a muralha tenha sido intervencionada desde a sua construção. O registo das intervenções a que se teve acesso foi realizado nos últimos 20 anos por diversas entidades e que incluem a Câmara Municipal de Lisboa (CML), a Direcção-Geral do Património Cultural (DGPC), o

Centro de Arqueologia de Lisboa (CAL), a Empresa Pública de Urbanismo de Lisboa (EPUL), a Empresa Municipal de Mobilidade e Estacionamento de Lisboa (EMEL) e diversas empresas de arqueologia. Estão atualmente em curso várias intervenções em alguns troços da muralha.

Nas secções seguintes descrevem-se as principais intervenções realizadas na muralha nas duas últimas décadas, sendo que a sua apresentação segue a ordem desde o lanço Ocidental para o lanço Oriental, passando pelo lanço Fluvial Oriental e terminando de novo no lanço Ocidental.

2.4.1 1998 e 2006 – Lanço Ocidental: Torre do Jogo da Péla

A torre do Jogo da Péla tem sido alvo de várias intervenções talvez por estar numa zona central da cidade (Martim Moniz) e ser um dos elementos constituintes da muralha que se encontra mais visível e em melhor estado de conservação.

Em 1998 o geólogo Rui Brito, em colaboração com a Câmara Municipal de Lisboa, no âmbito do seu trabalho de mestrado, analisou algumas argamassas de reboco e de juntas de alvenaria de pedra e também do substrato rochoso presente a Oeste no terreno de implantação da estrutura. O estudo englobou diversos ensaios de caracterização laboratorial das amostras de argamassa e também das rochas recolhidas do substrato. Os resultados obtidos revelaram que as argamassas são constituídas por cal aérea carbonatada (CaCO_3) e areia siliciosa. Quanto às pedras utilizadas na alvenaria, foram classificadas em quatro tipos: dois arenitos, de grão fino e de grão muito fino, e 2 calcários, um margoso e outro conquífero (Brito, 1998).

Integrado nos trabalhos urbanísticos parcialmente realizados pela empresa EPUL, em 2006, foi possível a concretização de um levantamento topográfico e ortofotográfico, uma intervenção arqueológica no topo da torre e a realização de duas sondagens no subsolo contíguas à muralha e à torre como ilustrado na Figura 2.12. Estas sondagens permitiram revelar pormenores do embasamento da torre e a da intervenção no topo surgiu o aparecimento das tradicionais escadas que davam acesso aos caminhos de ronda da cidade (Leitão, 2014). A Figura 2.12 (a) revela um pormenor dos restos (“nódulos”) da argamassa de reboco original (assinalado com seta a vermelho) que perduraram junto à base da parede até aos dias de hoje.



Figura 2.12 – Imagens da intervenção arqueológica efetuada em 2006: pormenor da argamassa com presença de nódulos brancos de cal (seta vermelha) (a) parede e escada no interior da torre (b, c) (Leitão, 2014)

Os trabalhos arqueológicos e o acompanhamento à execução do projeto de arquitetura paisagística foram efetuados pelos arqueólogos Vasco Leitão e Manuela Leitão da CML e pelos arquitetos Gizela Costa e Pardal Monteiro da EPUL.

2.4.2 2016 – Lanço Oriental: São Vicente de Fora

Em 2016 foram executadas diversas intervenções no troço Oriental da muralha Fernandina, mais concretamente na antiga freguesia de São Vicente de Fora.

Uma primeira intervenção decorreu no âmbito das obras de construção de instalações sanitárias integradas num projeto de alojamento turístico e que se encontrava diretamente em contacto com a muralha. Comprovou-se que a taipa foi a técnica de construção utilizada nesta secção (Figura 2.13a). Esta intervenção foi solicitada pelo Departamento dos Bens Culturais (DBC) ao Departamento de Estudos, Projetos, Obras e Fiscalização (DEPOF) da DGPC, de forma a obter indicações sobre os procedimentos de tratamento e reparação da muralha nesta zona. Com a visualização da muralha foi notória a exposição a que a taipa estava sujeita (Figura 2.13b) sendo desconhecida a composição dos rebocos de argamassa existentes sobre ela, mas que não deverão ser os originais.

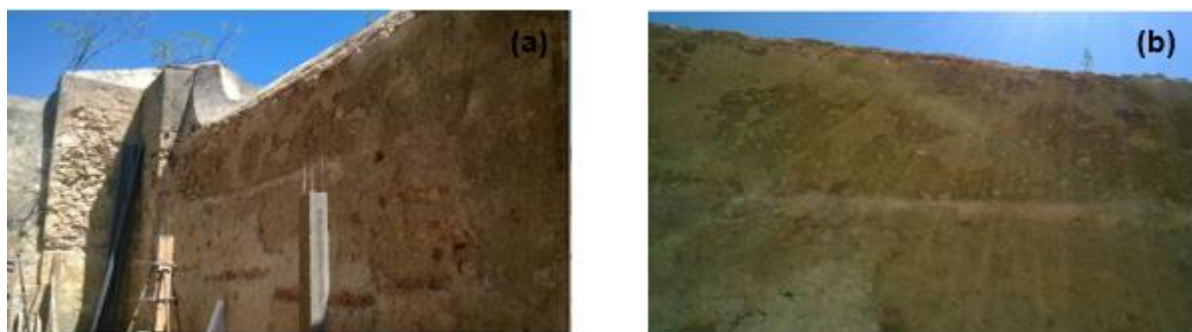


Figura 2.13 - Intervenção em 2016 no troço Oriental em S. Vicente de Fora: parede em taipa (a) e pormenor da exposição da parede (b) (Fernandes, 2016a)

Confirmou-se ainda que, na base das paredes de taipa da muralha, existiam lacunas que, devido à falta de proteção, aceleraram a degradação do material. Para solucionar estes problemas, foi proposto reforçar a base da parede de taipa com uma alvenaria de pedra com argamassa de assentamento de cal hidráulica natural (NHL3,5 ou NHL5) com traço em massa de 1:2 ou 1:3. Para colmatar as fissuras, buracos e juntas encontradas ao longo do paramento, foi recomendada a aplicação de uma argamassa de cal hidráulica natural de cor semelhante à do reboco existente na altura. Foi ainda sugerido que entre a muralha e os compartimentos em contacto com ela fosse construída uma parede de alvenaria de tijolo furado (isolada pelo interior com azulejo ou outro revestimento semelhante), para tentar minorar a probabilidade de ocorrência de futuros problemas de humidade e infiltrações, uma vez que a taipa apresentava indícios de presença de água (Fernandes, 2016a).

Numa outra intervenção, também ela efetuada pela DGPC, foi realizada uma visita preliminar ao local onde atualmente se encontra o recente parque de estacionamento da Graça, propriedade da

EMEL. Esta intervenção serviu para fazer uma análise visual ao local (Logradouro da 4ª Companhia do Regimento de Sapadores Bombeiros). Detetaram-se sectores da muralha em taipa (Figura 2.14a) revestida com rebocos não originais à base de cimento. No topo da muralha pode constatar-se a existência de alvenarias de tijolo de remate aplicadas muito posteriormente. Foi possível ainda encontrar, graças a sondagens, vestígios de um postigo inserido num dos sectores da muralha (Figura 2.14b) (Fernandes, 2016b).

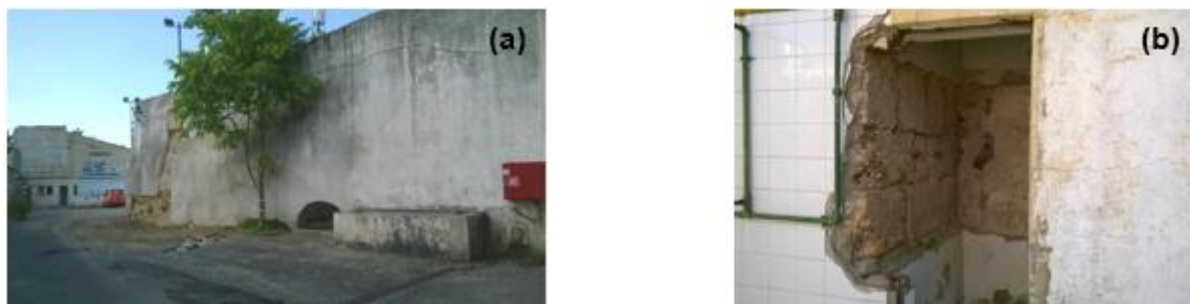


Figura 2.14 - Intervenção em 2016 no parque de estacionamento da EMEL na Graça: (a) vista do logradouro dos bombeiros com parede de taipa e (b) postigo em alvenaria de pedra regular (Fernandes, 2016b)

As intervenções arqueológicas neste sector têm sido levadas a cabo pela empresa Arqueologia e Património. O local intervencionado, por se integrar numa área de valor arqueológico nível I e II no PDM de Lisboa, apontou para a obrigatoriedade de trabalhos de preservação e salvaguarda do património identificado. Os trabalhos decorreram entre os dias 17 de fevereiro e 2 de março de 2016.

Das sondagens arqueológicas efetuadas, foi analisado um paramento da muralha, orientado a Oeste, que revelou o assentamento da primeira camada de taipa no substrato geológico argiloso do local (Figura 2.15). Quaisquer vestígios de valas de fundações ou nível de circulação exterior da muralha foram destruídos. Pelo que se constou, a cota inicial do substrato poderia estar a um valor semelhante à do piso rodoviário (Oliveira e Manso, 2018). O corte dos substratos geológicos e as ações de constante mudança na altimetria do terreno ao longo dos anos fizeram com que não se tenham grandes certezas quanto às fundações da muralha.



Figura 2.15 - Intervenção em 2016 no paramento Oeste (Rua da Verónica): base da muralha com evidência de camada de taipa (Oliveira e Manso, 2018)

No que diz respeito às intervenções de arqueologia da arquitetura, muito importantes para a caracterização das estruturas, foram realizadas quatro sondagens (S1, S2, S3 e S4) utilizando o princípio da estratigrafia arqueológica aplicada às estruturas de Harris (1989). Numa primeira sondagem (Figura 2.16a) realizada junto ao paramento Oeste (Figura 2.15) surgiu o substrato rochoso, constituinte da muralha, com o material muito alterado devido a ter estado sujeito a grandes exposições atmosféricas e outros fatores. Para se tentar perceber as dimensões daquele troço e confirmar os dados de Vieira da Silva (1987a), a sondagem foi de comprimento (Figura 2.16b) em relação aos 3 m inicialmente definidos, tendo revelado que aquele elemento em estudo era um dos cubelos - o 3º cubelo presente neste troço da muralha.

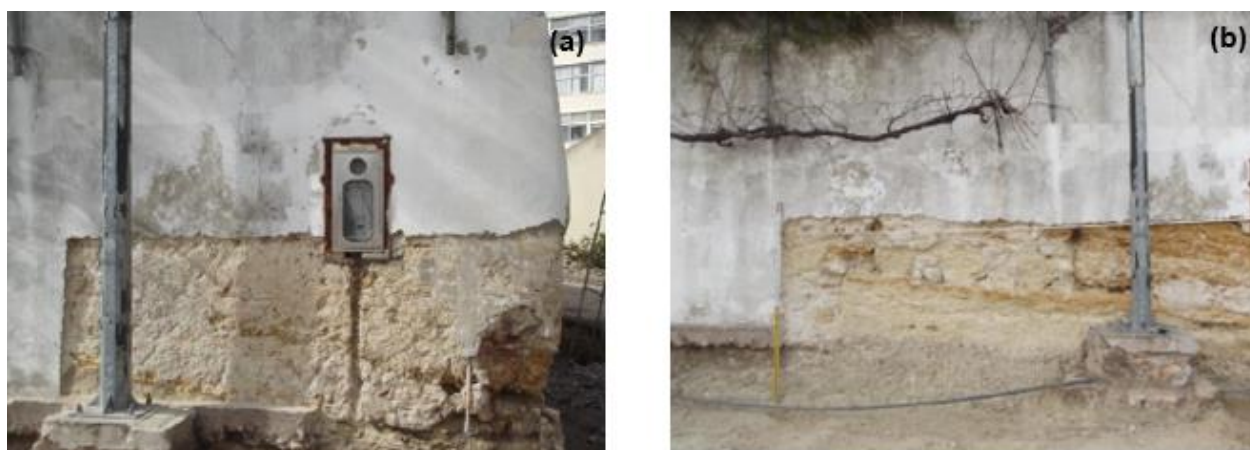


Figura 2.16 - Intervenção em 2016 no paramento Oeste (Rua da Verónica): (a) sondagem S1 com substrato rochoso e (b) alargamento do comprimento de sondagem (Oliveira e Manso, 2018)

Dada a heterogeneidade da composição material da muralha, a sondagem S2 veio a revelar precisamente essa diversidade de argamassas de reboco com diferentes constituintes, taipa e alvenarias empregues. Na Figura 2.17 (a) ocorrem duas argamassas de reboco muito semelhantes, embora em níveis distintos, o que poderá confirmar a utilização do mesmo tipo de ligante (cal) na sua conceção e que apenas sejam diferenciadas nos agregados, uma vez que, no nível superior, os agregados cerâmicos predominam (Oliveira e Manso, 2018). Dada a possibilidade de remoção das argamassas de reboco, a estrutura original da muralha apareceu e, dada a continuidade da construção deste paramento a Sul com o paramento a Oeste, foi possível verificar a construção em taipa com 4 camadas diferentes em composição e em espessura (Figura 2.17b). Foi visível e identificado o sistema construtivo, nomeadamente a marca dos limites superior e inferior dos taipais, as juntas e três aberturas das agulhas metálicas (Bruno, 2000).

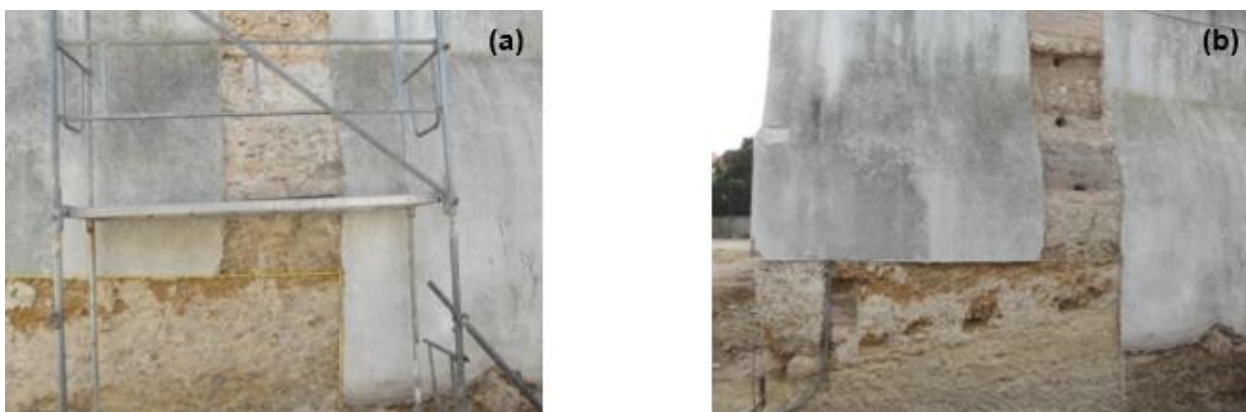


Figura 2.17 - Intervenção em 2016 no paramento Este (Rua da Verónica): (a) sondagem S2 com argamassas de reboco em 2 níveis e (b) abertura das agulhas para montagem original dos taipais (Oliveira e Manso, 2018)

Nas sondagens S3 e S4, realizadas no paramento a Norte e no interior de uma pequena abertura, respetivamente, foi confirmada, uma vez mais, a existência da construção em taipa (Figura 2.18a), desta vez num dos cubelos mencionados por Vieira da Silva (1987a) e de um postigo (Figura 2.18b) constituído por alvenaria aparelhada de pedra calcária (Oliveira e Manso, 2018).

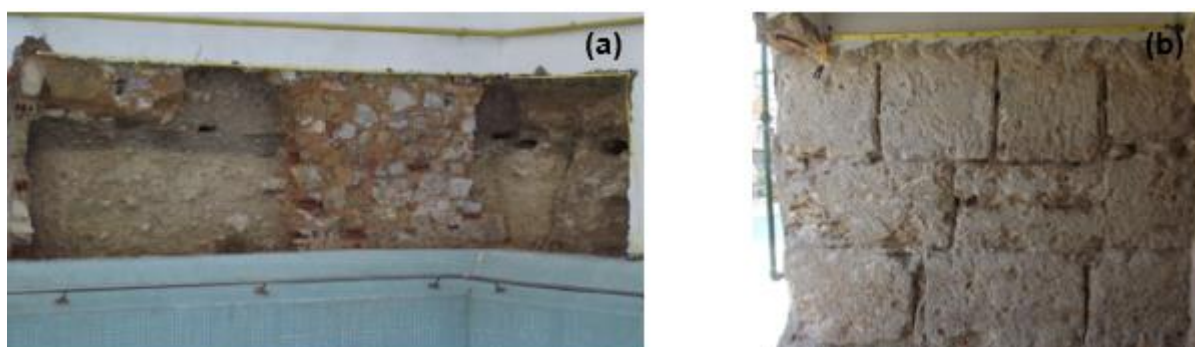


Figura 2.18 - Intervenção em 2016 no paramento a Norte (Rua da Verónica): (a) sondagem S3 com paramento Norte em taipa e (b) sondagem S4 com abertura de postigo (Oliveira e Manso, 2018)

É referido que nas sondagens atrás referidas foram recolhidas e caracterizadas, visualmente e laboratorialmente, amostras de diversos materiais; contudo, não foi possível ter acesso aos resultados obtidos.

2.4.3 2007/2008 – Lanço Fluvial Oriental: Largo do Chafariz de Dentro

No decorrer dos trabalhos arqueológicos e urbanísticos realizados no Largo do Chafariz de Dentro entre 2007 e 2008, inseridos na renovação do sistema de tratamento de águas residuais desta zona do bairro de Alfama (Figura 2.19), realizaram-se escavações que permitiram aceder ao troço da muralha neste largo (troço fluvial Oriental). Nele estavam incluídas duas torres; ainda hoje se preserva o local

onde uma delas se encontrava, manifestando-se pela presença de um vão de escadas nos edifícios situados na Rua do Terreiro do Trigo, 2-4, que dariam acesso ao adarve – caminhos de circulação no topo da muralha. Numa das fases dos trabalhos, as valas de fundação da muralha foram os elementos que surgiram sendo evidente parte da madeira que serviu de cofragem (grande parte das tábuas de madeira). O aparecimento de outros vestígios, como andaimes ou escoras, também em madeira, revelaram alguns dos métodos empregues na construção estrutura amuralhada (Banha et al., 2012).



Figura 2.19 - Plano geral da intervenção urbanística realizada em 2007 no Largo do Chafariz de Dentro, em Alfama (Banha et al., 2012)

2.4.4 2016/2017 – Lanço Fluvial Oriental: Rua do Terreiro do Trigo

Posteriormente aos trabalhos anteriormente referidos na secção 2.4.3, entre 16/11/2016 e 01/03/2017, a empresa Atalaia Plural – Arqueologia, Património e Território e os arqueólogos Alexandra Krus, Vasco Vieira e José Vintém, executaram as intervenções de arqueologia no decorrer dos trabalhos de reabilitação dos edifícios da Rua do Terreiro do Trigo, 6-26.

A deteção de troço da muralha Fernandina inserida no interior destes edifícios fez com que as intervenções de reabilitação fossem interrompidas, predominantemente nas fachadas orientadas a Nordeste (retaguarda) e Sudoeste, com a presença de paredes principais da muralha do troço fluvial Oriental e a ligação destas a uma torre.

Ao nível do 1º e 2º piso foram executadas picagens na parede orientada a Nordeste (Figura 2.20a). Foi verificada a presença de diversos elementos que fornecem informação relativa à construção da muralha, como é o caso dos taipais de construção do adarve bem como as aberturas das agulhas aquando da execução da taipa (Figura 2.20b). Vários tipos de argamassa também foram identificados, predominantemente constituídas por cal (nódulos de cal bastante visíveis) e por agregados cerâmicos, arenosos e calcários. Nesta fachada a Nordeste, para além de ainda estar conservada parte original da muralha, foi possível identificar outros materiais que foram sendo aplicados ao longo dos anos (Figura 2.20c) e que não são compatíveis nem semelhantes aos originais (Krus, 2017).

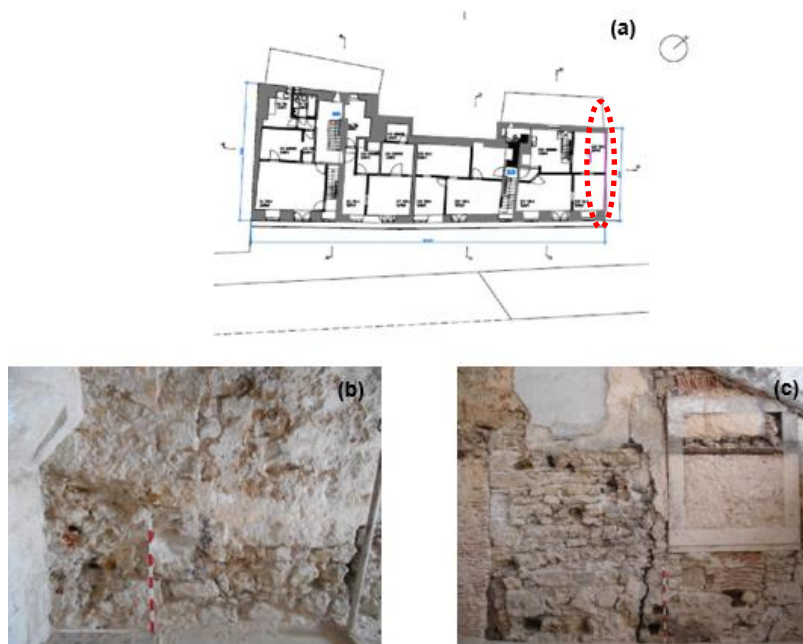


Figura 2.20 - Intervenção na fachada Nordeste de edifício localizado na Rua do Terreiro do Trigo: (a) localização em planta; (b) 1º piso com adarve da torre e (c) 2º piso com a presença de agulhas (Krus, 2017)

No alçado orientado a nordeste da fachada de tardo e no saguão ao nível do piso 0 (Figura 2.21a) foram, também, encontrados vestígios da muralha. No primeiro caso (Figura 2.21b) é visível a parte interna da muralha em alvenaria de pedra argamassada disposta irregularmente ao longo do paramento com agregados de natureza cerâmica, calcária, seixo, saibro e fragmentos de ossos. No segundo caso, no saguão (Figura 2.21c) foi identificada a abertura de um vão de uma porta da muralha e posteriormente fechada (Krus, 2017).

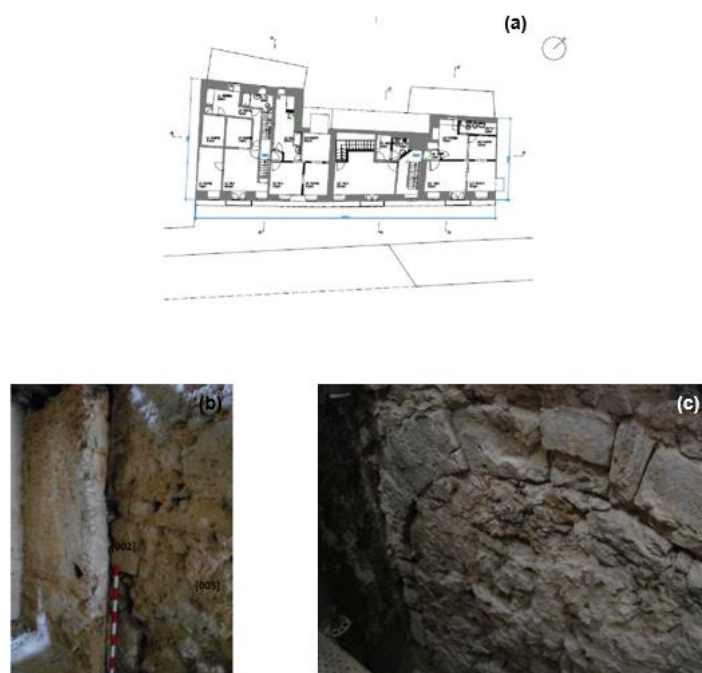


Figura 2.21 - Intervenção na fachada Nordeste de edifício localizado na Rua do Terreiro do Trigo: (a) localização em planta, (b) enchimento da muralha e (c) vão de uma porta da muralha (Krus, 2017)

2.4.5 2014 – Lanço Ocidental: Rua António Maria Cardoso

Na Rua António Maria Cardoso, 9-13, localizada junto ao centro histórico da cidade, foram efetuadas em 2014 intervenções por parte do DEPOF a pedido do DSPAA, ambos departamentos da DGPC, dada a deteção da presença de vestígios da muralha Fernandina no interior dos imóveis, bem como no logradouro existente na sua fachada de tardoz. As intervenções tiveram como objetivo identificar o estado de conservação material que constitui a muralha naquele sector e referir quais as melhores alternativas de tratamento a aplicar na muralha, de maneira a preservar e devolver as características que caracterizam a estrutura amuralhada. Desta forma, foram identificadas paredes principais da muralha no interior do edifício em razoável estado de preservação, com a presença das lacunas deixadas pelas agulhas, justificando a taipa como técnica de construção utilizada neste troço, com as diversas camadas de compactação (Figura 2.22a). Estas paredes continuam para o exterior, no qual se situa um logradouro pertencente aos imóveis, sendo possível verificar um paramento da muralha num avançado estado de degradação devida à exposição aos agentes atmosféricos agressivos (Figura 2.22b).

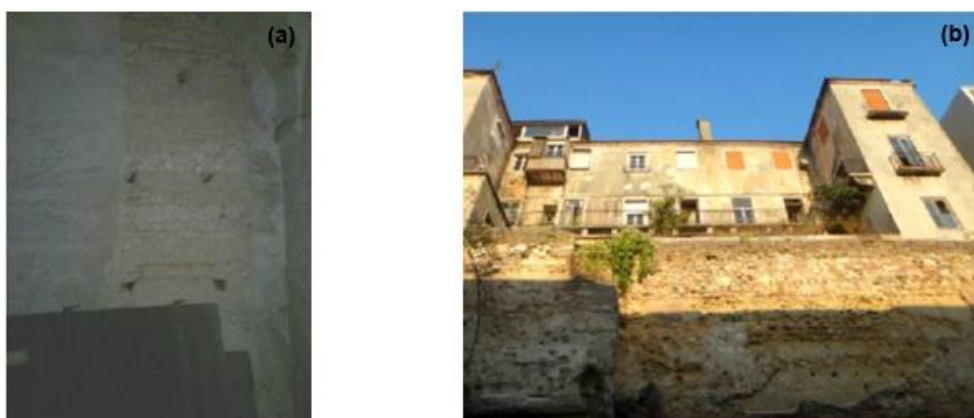


Figura 2.22 - Intervenção em 2014 na Rua António Maria Cardoso: (a) presença das agulhas de construção da taipa nas paredes interiores e (b) paramento da muralha visível no logradouro dos edifícios (Fernandes, 2014)

Neste sentido, foram várias as propostas de intervenção na muralha, destacando-se no exterior (logradouro) a colmatação de lacunas existentes com recurso a argamassas de cal onde a espessura é diminuta e alvenaria de pedra e encasque de tijolo nas situações com maior espessura. Os dois paramentos da parede foram rebocados, em pelo menos duas camadas, a primeira com traço em massa de 1:3 ou 1:2,5 e a segunda com traço 1:4 com recurso a argamassas de cal hidráulica. No topo foi sugerida a mesma proteção com argamassa de cal hidráulica natural com traço em massa de 1:3. No interior dos edifícios foi recomendada a remoção das argamassas cimentícias, incompatíveis com o suporte, e deixar as argamassas de cal em bom estado de conservação, pois se estas fossem retiradas poderiam degradar a taipa existente (Fernandes, 2014).

3 Descrição dos troços inspeccionados – casos de estudo

Na sequência dos trabalhos descritos na secção 2.4 e na análise bibliográfica histórica e técnica, que se revelou ser escassa, houve a possibilidade de avaliar numa fase preliminar e pouco aprofundada as principais características visuais da muralha Fernandina de Lisboa em diferentes locais da cidade de Lisboa, concretamente, em sete locais distintos, considerados como casos de estudo da presente dissertação, e ainda em mais dois locais que não foram inspeccionados presencialmente mas que se incluíram nos casos de estudo por se ter tido acesso à amostragem recolhida em anos prévios.

O objetivo principal das visitas aos locais foi o de recolher, essencialmente, o máximo de informação possível acerca do enquadramento da muralha nesses locais, os materiais e técnicas de construção implementadas consoante o seu sector, avaliar o seu estado de degradação/preservação dos materiais empregues, bem como recolher informações de contexto histórico de alguns edifícios onde a muralha está inserida, consoante o caso analisado.

A primeira visita decorreu no dia 23/11/2018 nos locais apresentados nas secções de 3.1 a 3.5 e no dia 19/12/2018 nos locais descritos em 3.6 e 3.7. Os locais 3.8 e 3.9 referem-se a casos de estudo cuja amostragem foi realizada pelas empresas responsáveis pelos trabalhos de arqueologia aí desenvolvidos.

A ordem das visitas aos casos de estudo foi realizada conforme apresentado nas secções 3.1 a 3.7, tendo cada local sido caracterizado individualmente, consoante a disponibilidade dos seus proprietários ou representantes. Na Figura 3.1 apresenta-se o mapeamento dos locais objeto de estudo na presente dissertação.

Muralha Fernandina

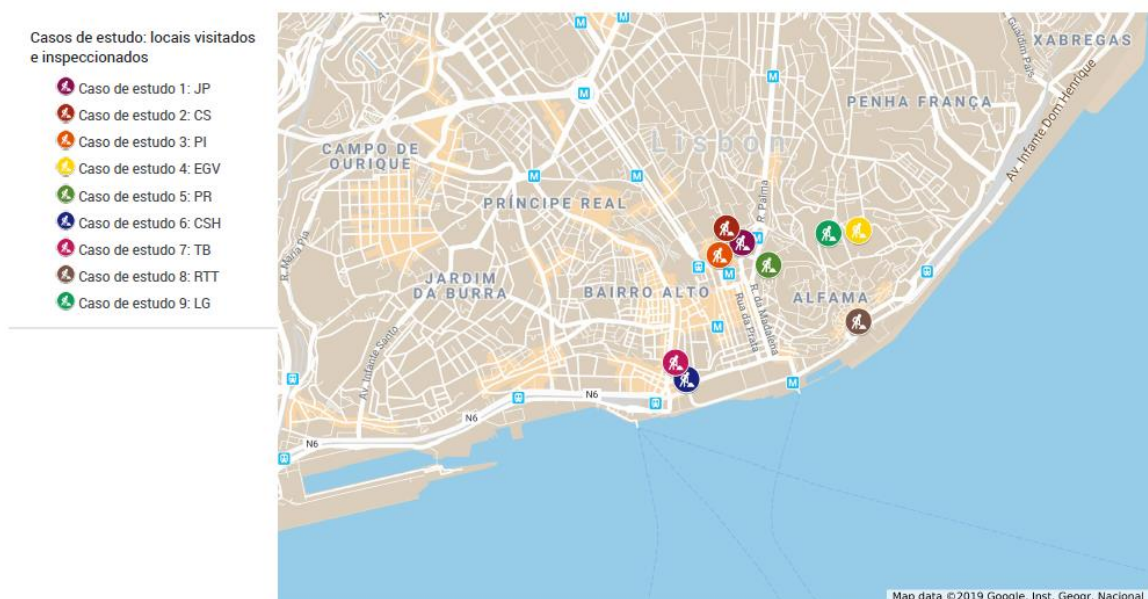


Figura 3.1 - Mapeamento dos vários troços da muralha Fernandina estudados (imagem retirada do Google Earth)

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos diversos trabalhos envolvendo esta estrutura, tais como demolições de antigos edifícios próximos à estrutura, obras de renovação de infraestruturas e anexação de novos edifícios, este último causando grande impacto na área envolvente à torre pela construção por parte da EPUL duma urbanização adjacente. A Figura 3.4 apresenta uma imagem do local da Torre antes e após a construção da urbanização da EPUL.



Figura 3.4 - Torre do Jogo da Péla (setas): a) Intervenção da EPUL em 2006 (W3); b) Imagem retirada do Google Earth em 2019

Em altura, a torre varia entre os 8 m do lado Poente e os 17,5 m do lado Este (Brito, 1998). No topo interior da torre existe um desaterro executado aquando das intervenções mencionadas por Leitão (2014) com as dimensões aproximadamente de 2,5 m \times 3,0 m. De forma a ter um conhecimento acerca da estratigrafia da alvenaria de pedra irregular argamassada que parecia constituir a torre, foram extraídas mecanicamente três carotes, duas obtidas na vertical com diâmetros de 74,5 mm e 74,4 mm e uma na horizontal de diâmetro 74,6 mm. As carotes verticais foram removidas no pavimento exposto do desaterro da torre (Figura 3.5a), enquanto a amostra horizontal foi removida na sua parede orientada a Oeste (Figura 3.5b).

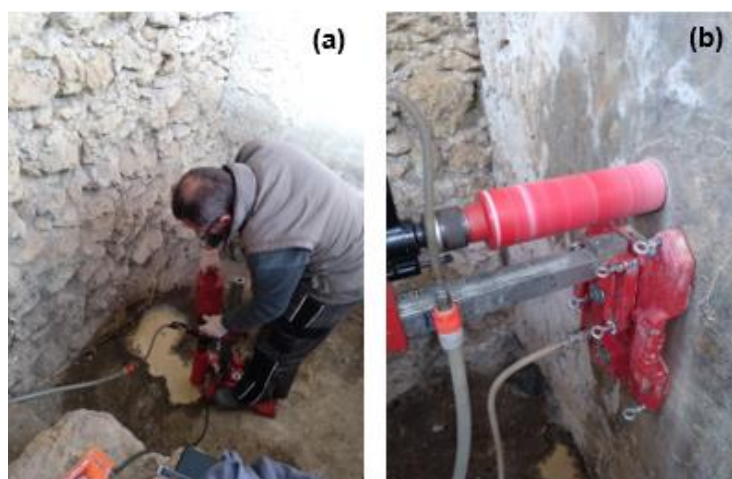


Figura 3.5 – Extração de carotes na Torre do Jogo da Péla: furo vertical (a) e horizontal (b)

Foram realizados alguns ensaios *in situ* nas paredes do desaterro. Atualmente, a Torre é propriedade da Câmara Municipal de Lisboa (CML) e estão em curso diversos projetos de integração e musealização do monumento.

3.2 Caso de estudo 2: Cubelo do Postigo de Santana

Este caso de estudo encontra-se situado num edifício na Calçada de Santana N^{os}. 131-137 como representado em planta destacado com a seta a negro (Figura 3.6) (38°43'00.7"N 9°08'19.2"W). No edifício encontra-se adossado um cubelo constituente da muralha (Figura 3.7): o Cubelo do Postigo de Santana (Figura 3.6). O cubelo faz parte do lanço Oriental da muralha e estava ligado ao postigo de Santana demolido em 1676 para dar lugar à atual Calçada de Santana (Archeofactu, 2013).

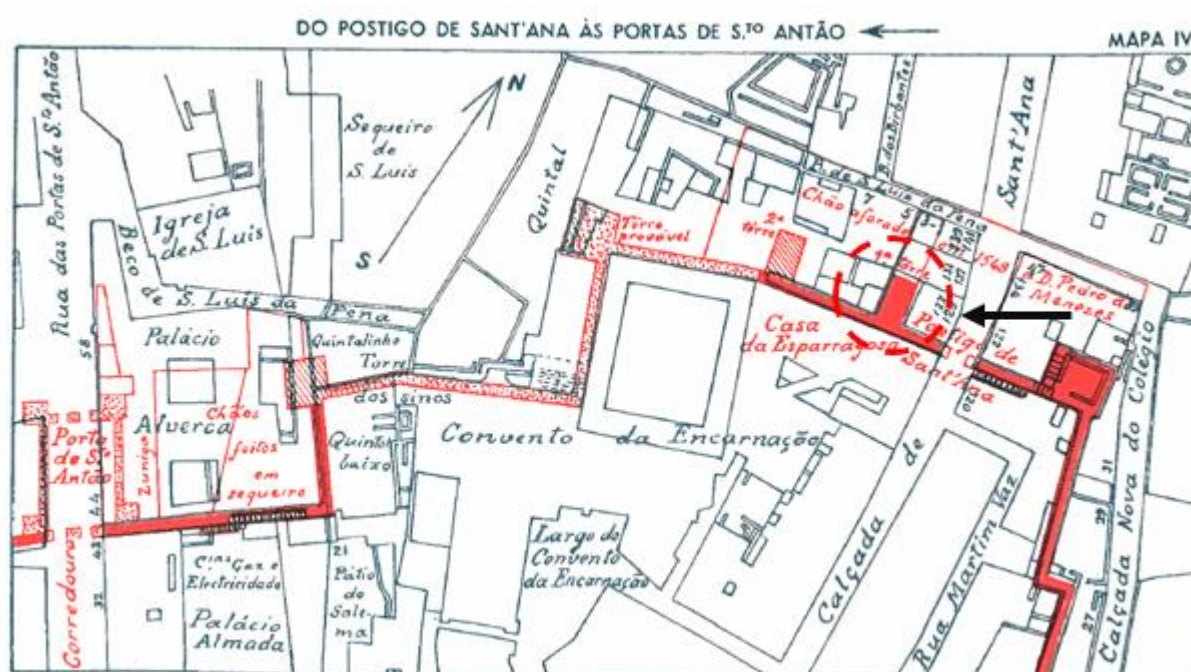


Figura 3.6 - Localização do cubelo (círculo a tracejado) designado por 1ª Torre na planta (adaptado de Vieira da Silva, 1987a)

Atualmente o edifício, que é propriedade de privados, está a ser reabilitado. O cubelo incorporado neste edifício terá dimensões, aproximadamente, em planta de 5,50 × 9,00 m e uma altura de 11 m (Vieira da Silva, 1987b) com orientação predominante Norte-Sul, como se verifica nos alçados da Figura 3.8. Tem no topo um terraço, ou eirado, com cerca de 36 m² de área com muros principais virados a Este e a Oeste (Figura 3.9). Em tempos estiveram lá instaladas capoeiras, canteiros e terra vegetal, entre outros elementos, que retiravam a autenticidade da estrutura e contribuíam para a sua degradação.

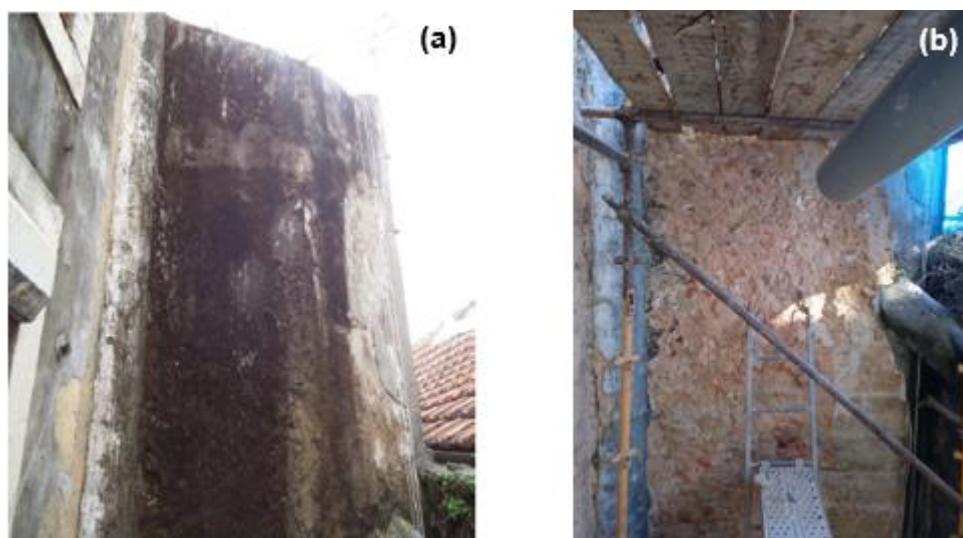


Figura 3.7 – Cubelo do Postigo de Santana: (a) em 2013 (Archeofactu, 2013) e (b) em 2018

Sem nenhuma visibilidade a partir do nível das ruas circundantes, destacando-se apenas quando emerge das coberturas dos edifícios adjacentes, o cubelo apresenta indícios de alterações ao longo do tempo, a começar pela própria altura. Segundo Vieira da Silva (1987), os cubelos teriam altura igual à dos muros da muralha (cerca de 8 m) o que indica um possível enchimento posterior até à atual cota do terraço existente.

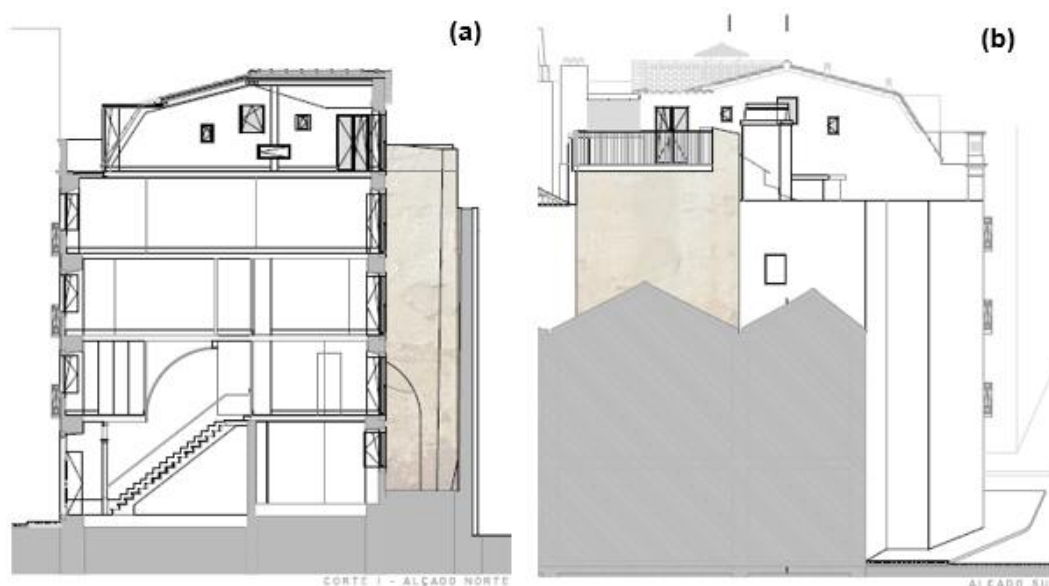


Figura 3.8 – Alçados do cubelo situado em edifício da Calçada de Santana: (a) a Norte e (b) a Sul (Valles, 2014)

O cubelo constitui uma parte muito importante integrante do edifício, uma vez que se pretende recuperar a função do espaço em terraço para uso-fruto da vista panorâmica sobre a cidade. Também é pretendida a recuperação dos seus paramentos, a que se tem acesso pelo saguão, através da

aplicação de argamassas de reboco de cal compatível com o suporte, removendo as existentes, provavelmente à base de cimento.

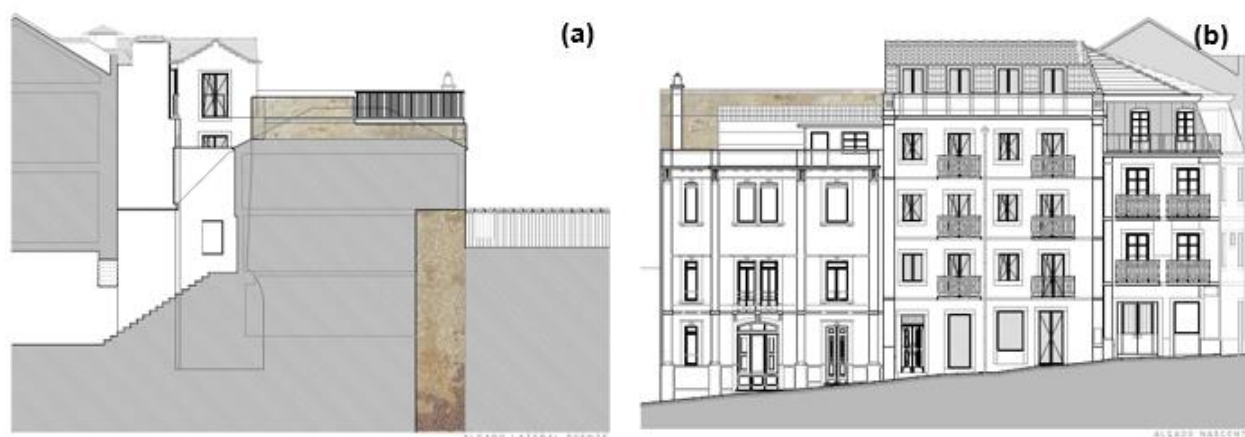


Figura 3.9 – Alçados do cubelo localizado em edifício na Calçada de Santana: (a) a Oeste e (b) a Este (Valles, 2014)

3.3 Caso de estudo 3: Muralha - Palácio da Independência

O Palácio da Independência, classificado como monumento nacional, encontra-se na Praça de São Domingos ($38^{\circ}42'54.7''N$ $9^{\circ}08'21.3''W$) muito perto da conhecida Praça do Rossio (Figura 3.10).

Fundado em 1467 por D. Fernando de Almada, o palácio tem uma elevada importância histórico-política dado que foi aqui que se reuniram por várias vezes aqueles que conduziram à Restauração da Independência de Portugal em 1640 (W4). No palácio estão presentes várias instituições, nomeadamente a Sociedade Histórica da Independência Militar de Portugal, o Museu da Identidade Lusíada e as sedes da Comissão Portuguesa de História Militar.

Nas traseiras do palácio (Figura 3.11a) existe um jardim onde está presente um sector amuralhado da Muralha Fernandina com cerca de 20 m de comprimento (Figura 3.11b) e uma escadaria – tipo antigo caminho de ronda - no seu topo, como se identifica a tracejado vermelho na planta da Figura 3.10.

Este troço de muralha pertencente ao seu lanço Ocidental encontra-se intensamente exposto à ação atmosférica (Figura 3.11c,d) o que pode justificar o estado de degradação do muro exposto a Sul, que constitui este sector. O mau estado de conservação advém de diversas intervenções que se têm verificado, como a inclusão de uma escadaria no topo que, segundo o levantamento de Vieira da Silva (1987) iniciado em 1948, já se encontrava anexada ao topo da muralha, e a reparação com diferentes e inapropriadas argamassas.

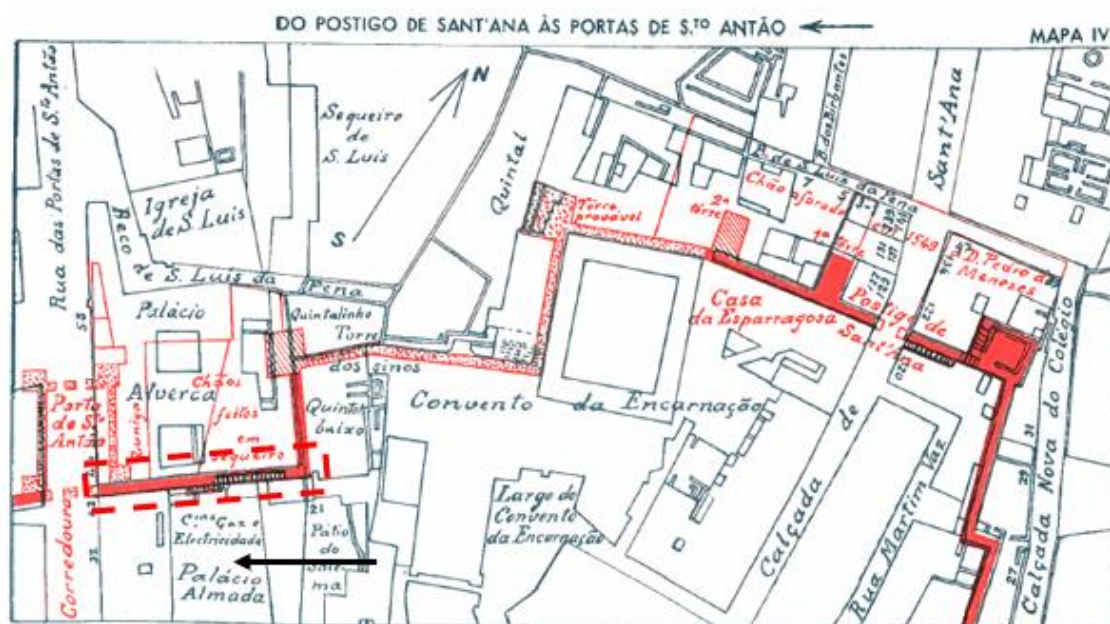


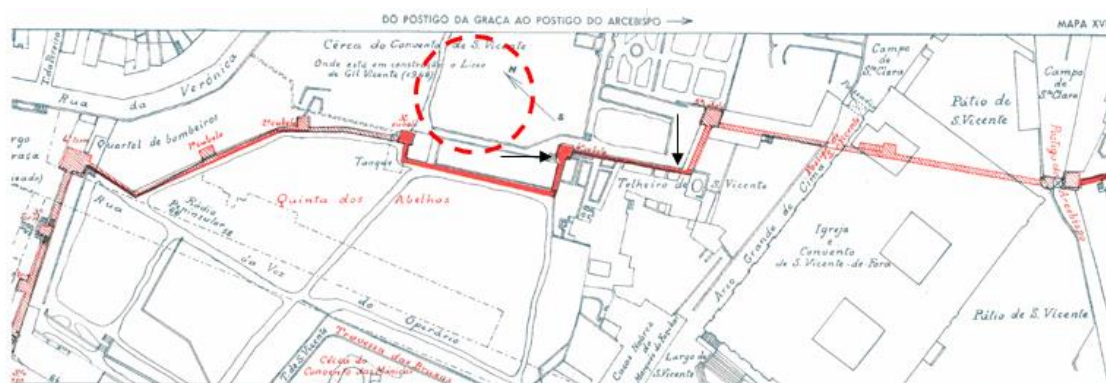
Figura 3.10 – Localização em planta do Palácio da Independência (seta a negro) e do sector da muralha visitado (retângulo tracejado a vermelho) (adaptado de Vieira da Silva, 1987a)

Dada a falta de coesão e tipo de alvenaria usada, neste local não foi possível retirar qualquer amostra por carotagem, apenas alguns fragmentos da argamassa da alvenaria. Visualmente foi possível verificar na fachada exposta a Sul que se tratava duma alvenaria de pedra calcária irregular argamassada juntamente com fragmentos de outros agregados maioritariamente cerâmicos, muito provavelmente utilizados em encasques posteriores, dos quais foi possível extrair alguns fragmentos.



Figura 3.11 – Palácio da Independência: (a) jardim do palácio; (b) troço inspecionado; (c, d) zonas nos muros evidenciando forte degradação

No recinto da escola está presente um troço da muralha com cerca de 50 m de comprimento em muito bom estado de preservação e relativamente bem protegido. Este local está inserido no lanço Oriental da muralha, sendo o único desse lado da cidade que foi inspecionado.



São visíveis vários elementos da muralha, onde se destacam os dois cubelos identificados nesta zona por Vieira da Silva (1987b), ilustrados na Figura 3.13, uma abertura designada por “nicho” que foi executada posteriormente à construção da muralha e também paredes principais ou muros.



28

As técnicas de construção neste local destacam-se principalmente pela alvenaria de pedra regular presente nos cantos e base dos cubelos existentes nesta secção visitada. A taipa, também ela uma técnica construtiva utilizada na construção da muralha, está presente tanto nos cubelos como nas paredes principais da muralha.

Neste local de referência foi possível a extração de três carotes (Figura 3.14), sendo duas delas do paramento da muralha identificado na Figura 3.14 (a) e a outra extraída do cubelo (Figura 3.14b), ambos os locais identificados com a seta a negro na Figura 3.12.

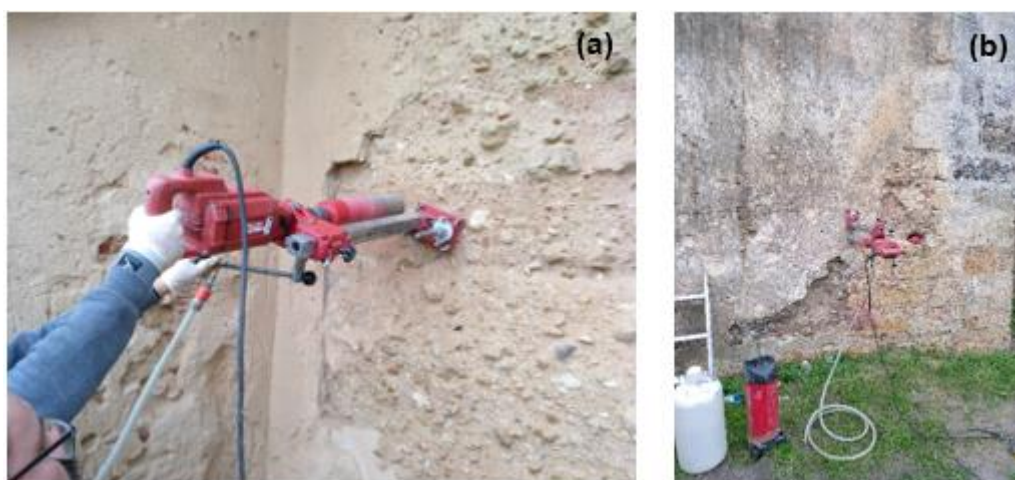


Figura 3.14 – Extração de carotes na Escola Básica e Secundária Gil Vicente: (a) paramento da muralha em taipa e (b) no cubelo

3.5 Caso de estudo 5: Muralha - Palácio da Rosa

O Palácio da Rosa está localizado no lanço Ocidental da muralha ($38^{\circ}42'54.2''N$ $9^{\circ}08'04.8''W$), muito próximo ao Castelo de São Jorge (Figura 3.15).

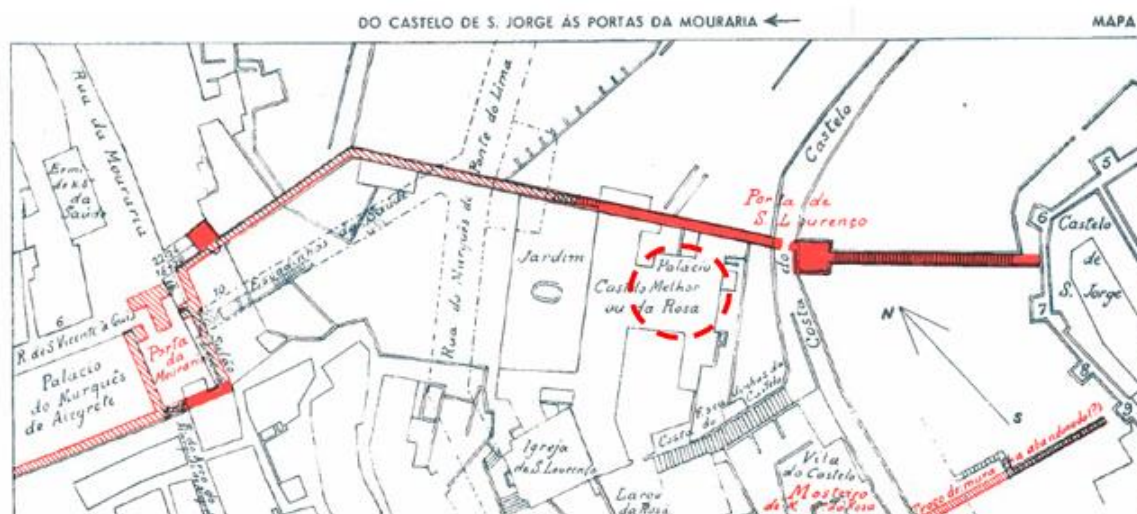


Figura 3.15 – Localização em planta (círculo a tracejado) do Palácio da Rosa (adaptado de Vieira da Silva, 1987a)

O Palácio da Rosa está classificado como monumento de interesse público e a data da sua construção é incerta, embora durante o século XVII tenha sofrido intervenções de carácter arquitetónico, de reconstrução e de reabilitação. O Palácio foi vendido pela família proprietária dos Marqueses de Ponte de Lima à CML no ano de 1970 (Pinto, sem data). Após a aquisição por parte do município diversos projetos foram pensados para o palácio, maioritariamente de cariz cultural e social. Entretanto, foi vendido e atualmente é propriedade privada, encontrando-se de momento em trabalhos de escavações arqueológica – devido à presença de um troço da muralha, para posteriormente ser convertido num luxuoso hotel.

O edifício, de planta retangular irregular em L, caracteriza-se por ter amplos salões e outras divisões constituintes do mesmo que sofreram danos em consequência do terramoto de 1755 que destruiu grande parte do edificado na cidade de Lisboa (Gonçalves, 1994). Na Figura 3.16 pode observar-se as fachadas principais orientadas a Oeste e a Sul.



Figura 3.16 – Palácio da Rosa: (a) Entrada principal, (b) fachada virada a Sul, (c, d) vistas da fachada exposta a Oeste

3.6 Caso de estudo 6: Torre João Bretão - Corpo Santo Hotel

[illegible]

O Hotel oferece no piso – 1, a hóspedes e visitantes, uma enorme sala onde se encontram os vestígios preservados da muralha, nomeadamente, uma das torres – Torre João Bretão (Figura 3.18a), e uma secção amuralhada adjacente (Figura 3.18b).

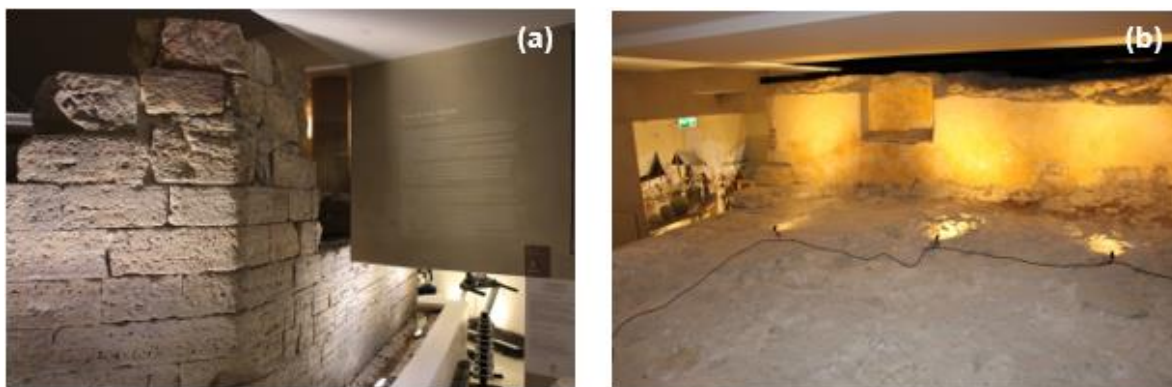


Figura 3.18 – Corpo Santo Hotel: (a) vestígios da muralha da Torre de João Bretão em alvenaria de pedra bem aparelhada e (b) núcleo da Torre de João Bretão

Foram extraídas duas carotes (furos verticais) no topo da Torre João Bretão (Figura 3.19) revelando diferentes composições de material. Uma das carotes é composta maioritariamente por pedra calcária e uma pequena porção de argamassa com aspeto recente, e a outra carote, de comprimento mais curto, era constituída maioritariamente por argamassa igualmente com aspeto recente, provavelmente resultado das intervenções de conservação mencionadas anteriormente. No geral, a estrutura encontra-se em bom estado de preservação.

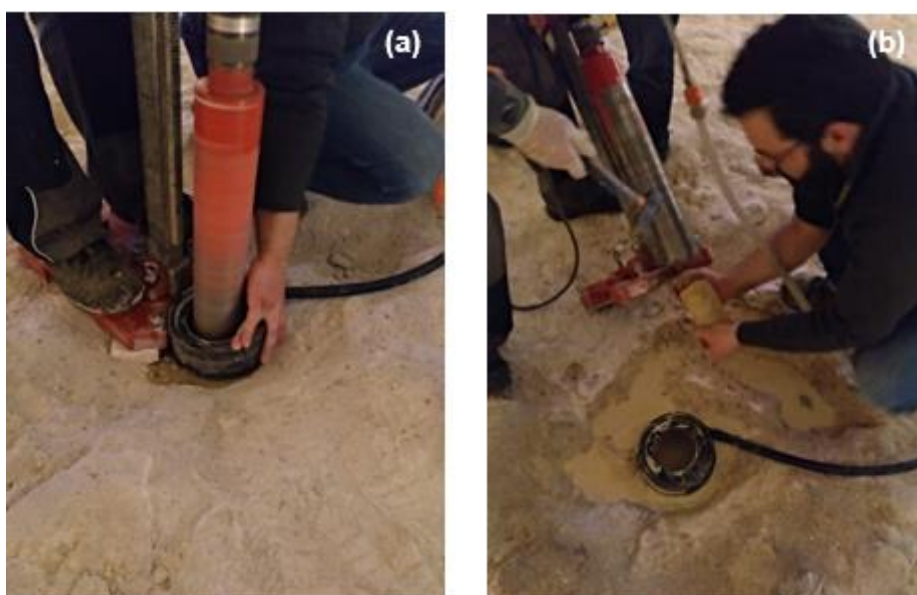


Figura 3.19 – Torre de João Bretão: (a) pormenor da instalação da carotadora (furo vertical) e (b) remoção da carote

3.7 Caso de estudo 7: Muralha e Torre - Condomínio dos Terraços de Bragança

O condomínio dos Terraços de Bragança é um complexo de apartamentos localizado na Rua do Alecrim ($38^{\circ}42'29.4''N$ $9^{\circ}08'34.8''W$), junto ao Cais do Sodré como ilustra a Figura 3.20.

O complexo é composto por oito edifícios de cinco blocos que foram desenhados pelo arquiteto Siza Vieira e a sua construção começou no ano de 2003 onde se verificou, na fase de demolições, a presença da muralha onde se inseria a antiga fábrica de cerveja Jansen. De mencionar que foi neste local que tiveram lugar as reuniões do chamado grupo do *Orpheu*, a revista que influenciou o modernismo literário português. O local abrange uma área de aproximadamente 5000 m² confinando com a Rua António Maria Cardoso a Nascente e a Rua do Alecrim a Poente, e situa-se numa zona histórica da cidade bastante movimentada.

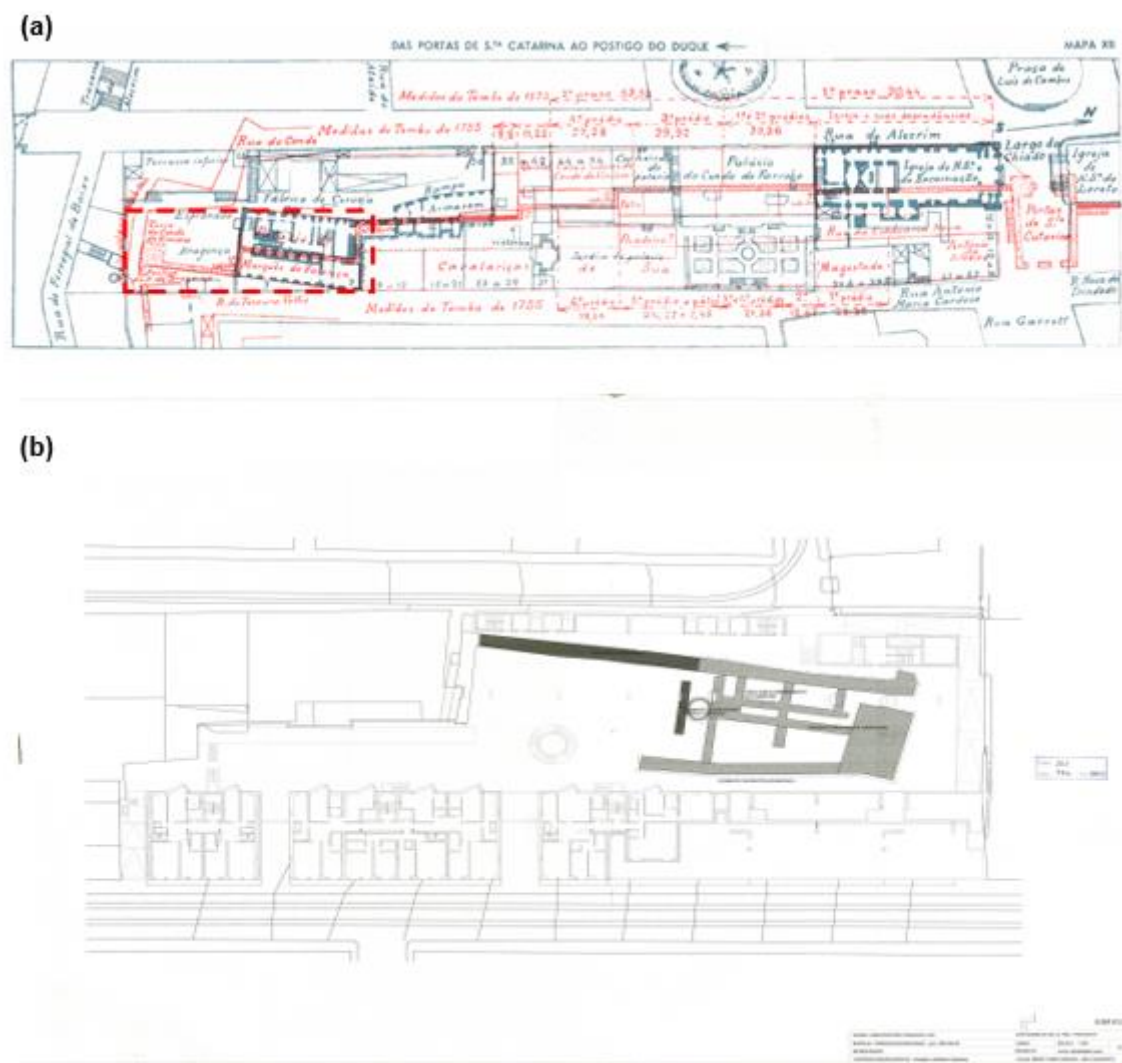


Figura 3.20 - Localização a tracejado do complexo em planta (adaptado de Vieira da Silva, 1987b) (a); Planta do projeto inicial com evidência a negro dos vestígios arqueológicos a restaurar (b)

Constituindo um dos melhores troços existentes da Muralha, foi possível a extração de quatro carotes provenientes de dois sectores diferentes. Duas carotes (obtidas por furos verticais) foram extraídas na torre (Figura 3.21a) tendo-se verificado que eram constituídas por alvenaria de pedra calcária irregular argamassada com cal aérea e diferentes agregados (siliciosos, cerâmicos e calcários). As outras duas carotes (obtidas por furos horizontais) foram extraídas da muralha em taipa do paramento exposto a Sul (Figura 3.21b).



Figura 3.21 – Muralha e Torre - Condomínio dos Terraços de Bragança: Extração de carotes verticais na torre (a) e horizontais no paramento da muralha em taipa (b)

3.8 Caso de estudo 8: Muralha - Edifícios 6-26 da Rua Terreiro do Trigo

Na Rua Terreiro do Trigo (Figura 3.22), concretamente nos edifícios 6-26, junto ao histórico bairro de Alfama ($38^{\circ}42'38.9''N$ $9^{\circ}07'42.7''W$) foi efetuada uma intervenção de reabilitação, tendo sido encontrados vestígios da muralha Fernandina de Lisboa. Estes vestígios puseram a descoberto paredes principais da muralha, uma torre – a Torre da Bica dos Cavalos – e um Postigo. Este local de referência está inserido no lanço Fluvial Oriental, junto ao rio Tejo, sendo, em conjunto com o caso de estudo 6, pertencentes a este lado da cintura de muralhas.

Ao nível dos pisos 1 e 2 do referido edifício, nomeadamente no alçado Noroeste, verificou-se (Figura 3.23) a presença de paredes principais da estrutura amuralhada com enfoque para os buracos originais das agulhas da técnica de construção em taipa, muito característica desta tecnologia construtiva. A presença do adarve, caminho ou piso de circulação da muralha é também identificada neste troço da muralha junto ao paramento da torre aí existente.



Figura 3.22 - Localização em planta (área a tracejado) do conjunto de edifícios intervencionados na da Rua Terreiro do Trigo (adaptado de Vieira da Silva, 1987b) (a); perspetiva da Rua Terreiro do Trigo (b); e fachada orientada a Sul (c)



Figura 3.23 – Paramentos principais das paredes da muralha: aparelho construtivo de alvenaria de pedra argamassada virada a noroeste (a) nicho da parede amuralhada localizada a NE e vista transversal da parede no piso 1 (c) (Krus, 2017)

Neste caso de estudo, aquando dos trabalhos de natureza arqueológica foram extraídas amostras de três elementos, que foram caracterizadas no âmbito deste trabalho.

3.9 Caso de estudo 9: Muralha - Largo da Graça

O Largo da Graça, localizado no bairro com a mesma denominação, é um dos muitos locais de roteiro turístico da cidade de Lisboa. Encontra-se numa área junto ao miradouro de Nossa Senhora do Monte e ao Convento e Igreja da Graça (Figura 3.24), com coordenadas 38°43'0.2"N 9°07'48.6"W. Antes da construção da muralha Fernandina de Lisboa, o largo encontrava-se fora da cintura de muralhas existentes na altura, isto é, o largo estava fora da Cerca Moura. Só aquando da construção, em 1373, é que passou a estar inserido nos domínios da cidade e, desta forma, protegido. Este facto é comprovado, através dos vestígios da superestrutura presentes no quartel dos bombeiros, bem como nas intervenções realizadas em 2016 no próprio Largo.

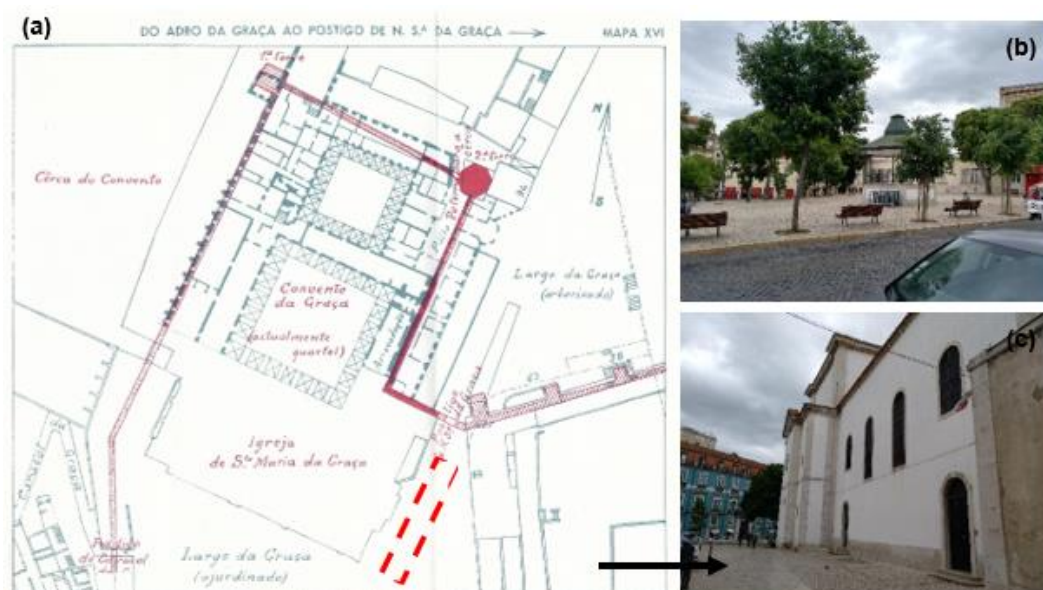


Figura 3.24 – Localização em planta (zona a tracejado) do local de extração das amostras no Largo da Graça (adaptado de Vieira da Silva, 1987b) (a); perspetiva atual do local de referência (b); Igreja da Graça junto ao traçado da muralha neste troço

Nas intervenções de arqueologia no local realizadas foi possível a recolha de algumas amostras referentes a argamassas de cal da alvenaria de pedra e também da taipa (Figura 3.25) que, segundo Vieira da Silva (1987b), pertenceram ao troço de muralha entre o Quartel e a Igreja da Graça.



Figura 3.25 – Largo da Graça: (a) local junto à Igreja da Graça onde foram recolhidas as amostras de argamassa e de taipa (W5)

4 Campanha experimental

4.1 Considerações gerais

A caracterização e análise material da Muralha Fernandina de Lisboa visa avaliar a composição do interior das paredes principais ou muros da muralha e/ou dos diferentes elementos que a constituem, tais como os cubelos, as torres e alguns postigos. Desta forma é indispensável executar esta caracterização, tanto a nível quantitativo como qualitativo. O material predominante é a taipa, a pedra e diversas argamassas. Para tal, e com o intuito de aumentar o conhecimento dentro desta área de estudo específica e recolher o máximo de informação sobre este tipo de património e construção em questão, foi definida uma vasta campanha experimental repartida entre a realização de ensaios não destrutivos *in situ*, a recolha de amostras e a realização em laboratório de ensaios físicos, mecânicos, químicos e mineralógicos. Os dados dos resultados obtidos referentes às visitas e inspeções realizadas serão posteriormente analisados, correlacionados e comparados com outras análises anteriormente feitas no âmbito de estudos anteriores em construções similares, referidos na bibliografia analisada.

No presente capítulo, são primeiramente apresentadas as amostras consideradas para a campanha experimental e a localização específica da zona de extração. Posteriormente são apresentados os procedimentos e as metodologias dos diferentes ensaios executados a que as diferentes amostras foram submetidas.

Para além da campanha experimental *in situ*, a parte da campanha experimental laboratorial foi desenvolvida em simultâneo nos laboratórios do Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (NMM/DM) e nos laboratórios de Construção (LabCON) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC/FCT NOVA).

4.2 Recolha de amostras *in situ*

Previamente à recolha de amostras, que decorreu entre finais de janeiro e início de fevereiro de 2019, efetuaram-se visitas preparatórias nos meses de novembro e dezembro de 2018. Durante estas visitas foi possível identificar os casos em que se poderia extrair amostras, tanto com recurso a carotagem como pela remoção de pequenos fragmentos.

Previamente à campanha experimental *in situ*, foi solicitada a autorização da DGPC para que fosse possível intervir na estrutura amuralhada e extrair as amostras necessárias para cada caso de estudo, dado tratar-se de um monumento nacional. Tendo em conta que a maior parte dos troços visitados em cada local de referência se inserem em propriedades privadas, os seus proprietários ou entidades responsáveis também tiveram, obviamente, de ter conhecimento prévio e dar o seu parecer favorável face ao que seria possível executar. Em alguns casos foi necessário providenciar o fornecimento de eletricidade e abastecimento de água aquando da realização dos trabalhos *in situ*.

A recolha de amostras *in situ* foi realizada nas semanas de 28/01/2019 e 01/02/2019, mesmo por vezes com condições atmosféricas de precipitação moderada, tendo sido previamente estabelecida uma ordem de trabalhos em cada local de referência. As carotagens, tanto verticais como horizontais,

foram executadas através do equipamento de perfuração mecânica HILTI DD 100 com coroa incorporada de diâmetro de 76 mm e comprimento de trabalho de 400 mm (Figura 4.1) nos casos de estudo de 1 a 5 (capítulo três).



Figura 4.1 – Fases da extração de carotes: carotagem vertical no cubelo da Calçada de Santana (a) e horizontal na Escola Gil Vicente (b)

Cada uma das amostras, após ter sido recolhida, foi colocada num saco e identificada de modo a referenciar o local de extração e o caso de estudo respetivo. As amostras foram devidamente armazenadas em caixotes de cartão com o necessário e máximo cuidado para que o material não fragmentasse. Após a inteira remoção das carotes, os furos foram colmatados com uma argamassa de reparação pré-doseada com base em cal hidráulica natural da SECIL ARGAMASSAS, comercializada com a designação - REABILITA Cal Consolidação, à qual foi adicionada uma brita calcária e pedaços de pedra que se encontrou junto aos respetivos troços da muralha, como se fosse um “encasque” para garantir a colmatação por inteiro dos orifícios de forma compatível com a própria muralha.

No total foram recolhidas 13 carotes em cinco locais, especificamente 3 na Torre do Jogo da Péla, 1 no cubelo da Calçada de Santana, 3 na Escola Básica e Secundária Gil Vicente, 4 no Condomínio dos Terraços de Bragança e 2 no Corpo Santo Hotel.

4.3 Identificação, caracterização macroscópica e seleção das amostras

Terminada a recolha de amostras nos locais atrás mencionados, as amostras foram transportadas para uma sala do LNEC devidamente condicionada a uma temperatura (T) de 20 ± 2 °C. Aí procedeu-se ao seu registo fotográfico, como representado na Tabela 4.1, e à sua caracterização macroscópica (Anexo A1). A terminologia utilizada refere-se ao local onde as amostras foram extraídas começando pelas iniciais do caso de estudo correspondente, seguida das letras M, T, P ou C que correspondem ao elemento da muralha onde a carote foi realizada, sendo M de muralha (paredes principais), T de torre, P de postigo e C de cubelo, respetivamente. Cada amostra foi depois identificada com um número atribuído pela ordem de extração no local ou pela ordem do troço de carote nos casos em que as carotes quebraram durante a extração.

Tabela 4.1 – Análise visual das amostras recolhidas





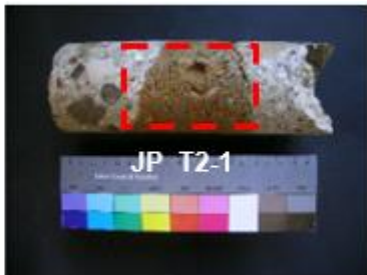
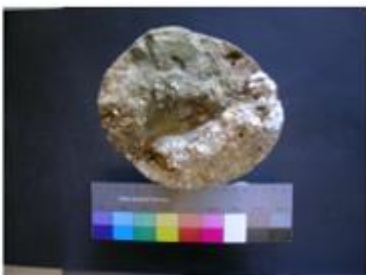





Caso de estudo	Identificação da amostra	Identificação do provete	Detalhes visuais das amostras/provetes
Torre do Jogo da Péla	JP_T1	JP_T1.1	  
		JP_T1.2	
		JP_T1.3	
	JP_T2	JP_T2.1	  
	JP_T3	JP_T3.1	   
		JP_T3.2	
		JP_T3.3	
	JP_T4	JP_T4	

Tabela 4.1 - Análise visual das amostras recolhidas (continuação)

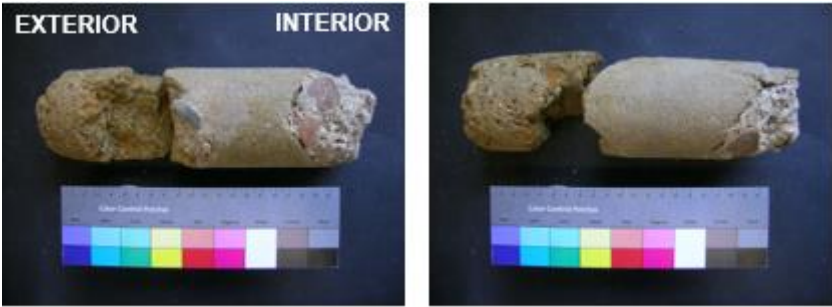
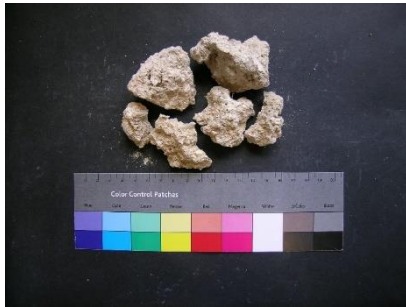



Caso de estudo	Identificação da amostra	Identificação do provete	Detalhes visuais das amostras/provetes
Calçada de Santana 131 - 137	CS_C	CS_C	
Palácio da Independência	PI_M	PI_M	
Escola Secundária e Básica Gil Vicente	EGV_M1	EGV_M1.1	
		EGV_M1.2	
Escola Secundária e Básica Gil Vicente	EGV_M2	EGV_M2.1	
			

Tabela 4.1 - Análise visual das amostras recolhidas (continuação)





Caso de estudo	Identificação da amostra	Identificação do provete	Detalhes visuais das amostras/provetes
Palácio da Rosa	PR_M3	PR_M3.1	
	PR_M6	PR_M6.1	
Corpo Santo Hotel	CSH_T1	CSH_T1.1	 
	CSH_T2	CSH_T2.1	

Tabela 4.1 - Análise visual das amostras recolhidas (continuação)


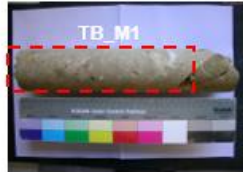





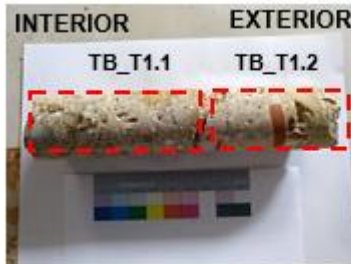









Caso de estudo	Identificação da amostra	Identificação do provete	Detalhes visuais das amostras/provetes
Condomínio dos Terraços de Bragança	TB_M1	TB_M1.1	  
		TB_M1.2	
	TB_M2	TB_M2.1	   
		TB_M2.2	
		TB_M2.3	
		TB_M2.4	
	TB_T1	TB_T1.1	  
		TB_T1.2	
	TB_T2	TB_T2.1	  
		TB_T2.2	

Tabela 4.1 - Análise visual das amostras recolhidas (continuação)

Caso de estudo	Identificação da amostra	Identificação do provete	Detalhes visuais das amostras/provetes
Rua Terreiro do Trigo 6-26	RTT_T	RTT_T.1	
	RTT_P	RTT_P.1	
	RTT_M	RTT_M.1	
Largo da Graça	LG_M	LG_M.1	

Posteriormente as carotes foram seccionadas em provetes cilíndricos, cujos topos foram regularizados para os ensaios físicos e mecânicos. O material sobran­te dos cortes foi utilizado para os ensaios químicos e mineralógicos. A nomenclatura dos provetes seguiu a já dada às amostras, apenas foi acrescentado um número sequencialmente a cada provete correspondente a cada amostra analisada (por exemplo para a amostra JP_T1, corresponderam os provetes JP_T1.1 a JP_T1.3).

O corte dos provetes cilíndricos foi efetuado numa máquina de corte *Struers TS* (Figura 4.2 – Operação de corte da carote para obtenção dos provetes para ensaios) no laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Ciências da Terra da FCT NOVA.



Figura 4.2 – Operação de corte da carote para obtenção dos provetes para ensaios

As amostras recolhidas encontram-se detalhadas no Anexo A1, onde é possível obter informação relativa à localização do sítio amostrado, o elemento da muralha em que foi recolhida, o tipo de material encontrado em cada carote, o estado geral da amostra.

Obtiveram-se 16 provetes no total, sete de taipa e os restantes nove são de argamassa de alvenaria composta por pedra calcária irregular e outros agregados, na sua maioria siliciosos e em alguns casos cerâmicos. Com base nos provetes cortados, mais concretamente com base na sua dimensão e quantidade, foi possível estabelecer os diferentes ensaios a executar em cada um deles.

Desta forma e para se ter uma melhor perceção dos provetes preparados, a Tabela 4.2 indica as amostras e os provetes respetivos utilizados nos diferentes ensaios.

A campanha experimental foi dividida em três fases distintas. Primeiramente a campanha incidiu, essencialmente durante a recolha das amostras (carotes e fragmentos), na realização de ensaios de caracterização *in situ* não destrutivos - resistência superficial pelo esclerómetro pendular, resistência superficial pelo equipamento *Martinet-Baronnie*, absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten e velocidade de propagação de ultrassons, sempre que fosse possível, dadas as condições em que se encontrava o material constituinte da muralha em cada local correspondente. Em segundo lugar, e após o corte das amostras e preparação dos provetes, ficou estipulada a realização dos ensaios físicos e mecânicos onde se incluem os ensaios laboratoriais de condutibilidade térmica, dureza

superficial através do durômetro, massa volúmica aparente pelo método geométrico, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade seguido do ensaio de secagem e por último ensaiaram-se os provetes à resistência à compressão diametral (ensaio Brasileiro ou Splitting test).

Tabela 4.2 – Organização dos provetes por tipo de ensaio

Amostra	Provete	Ensaio físico e mecânicos	Ensaio químicos e mineralógicos	
JP_T1	JP_T1.1	✖	✔	
	JP_T1.2	✔	✖	
	JP_T1.3	✖	✔	
JP_T2	JP_T2.1	✔	✖	
JP_T3	JP_T3.1		✔	✔
	JP_T3.2			
	JP_T3.3	✖		
EGV_M1	EGV_M1.1	✔	✖	
	EGV_M1.2	✖	✔	
EGV_M2	EGV_M2.1	✔	✖	
	EGV_M2.2	✖	✔	
CSH_T1	CSH_T1.1	✔	✖	
CSH_T2	CSH_T2.1	✖	✔	
TB_M1	TB_M1.1	✔	✖	
	TB_M1.2		✔	
	TB_M1.3	✖		
TB_M2	TB_M2.1	✔	✖	
	TB_M2.2		✔	
	TB_M2.3			
	TB_M2.4	✖		✔
TB_T1	TB_T1.1	✔	✖	
	TB_T1.2	✖	✔	
TB_T2	TB_T2.1	✔	✖	
	TB_T2.2			
PR_M3	PR_M3.1	✖		
PR_M6	PR_M6.1			
PI_M	PI_M.1			
LG_M	LG_M.1			
RTT_M	RTT_M.1			
RTT_P	RTT_P.1	✖	✔	
RTT_T	RTT_T.1			
CS_C	CS_C.1			

Notação: (✓) ensaio realizado e (✗) ensaio não realizado

A última fase estava reservada para os ensaios de natureza química e mineralógica, tais como a análise mineralógica por difração de raios X (DRX), a análise termogravimétrica (ATG/ATD/dTG) e a determinação do resíduo insolúvel em ácido (RI).

Nos ensaios físicos e mecânicos foram utilizados todos os provetes obtidos por corte, visto possuírem as mesmas dimensões, mas características materiais diferentes. Como se trata de materiais muitas vezes heterogêneos, desta forma torna-se mais válida a análise de resultados.

4.4 Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios *in situ*

Durante a recolha das amostras realizaram-se ensaios *in situ* para avaliar, numa primeira fase, as condições superficiais do material constituinte da muralha. Os ensaios executados da parte da manhã decorreram entre as 10:00 h e as 12:00 h, e os de tarde entre as 14:00 h e as 16:00 h. Durante os dias 28, 29 e 31 de janeiro de 2019, os valores de temperatura (T) registavam os valores de 13 °C nos dias 28 e 29 e 14 °C no dia 31, enquanto a humidade relativa (HR) registou valores de 79 %, 87 % e 92 %, respetivamente para os três dias.

Na Tabela 4.3 identificam-se os locais dos casos de estudo e o tipo de ensaio executado, pois nem sempre foi possível realizar os ensaios em todos os casos de estudo.

Tabela 4.3 – Ensaios *in situ* realizados por caso de estudo

Caso de estudo	Ensaio <i>in situ</i> não destrutivo			
	Resistência superficial pelo esclerómetro pendular	Resistência superficial pelo <i>Martinet-Baronnie</i> (choque de esfera)	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	Velocidade de propagação de ultrassons
Torre do Jogo da Péla	✓	✓	✓	✗
Edifício da Calçada de Santana 131-137	✗	✗	✗	✗
Palácio da Independência	✓	✗	✓	✗
Escola Básica e Secundária Gil Vicente	✗	✗	✗	✗
Palácio da Rosa	✗	✗	✗	✗
Corpo Santo Hotel	✗	✗	✗	✗
Condomínio Terraços de Bragança	✓	✓	✓	✓

Notação: (✓) ensaio realizado e (✗) ensaio não realizado

4.4.1 Resistência superficial pelo esclerómetro pendular

O ensaio de impacto do esclerómetro pendular possibilita a avaliação da resistência mecânica de um material através da sua dureza superficial. O método de ensaio baseou-se na norma ASTM C805

(ASTM, 2008). Para a execução do ensaio utilizou-se um esclerômetro de pêndulo do modelo *Schmidt PT* (Figura 4.3). Posiciona-se o equipamento numa superfície vertical e, através de uma mola, liberta-se o pêndulo de massa conhecida, provocando um impulso contra a superfície analisada. Mede-se o valor, numa escala graduada presente no equipamento, do ressalto, que permite avaliar a dureza. A classificação dos resultados é feita com base na ficha de ensaio FE Pa 39 (LNEC, 2016) conforme indicado na Tabela 4.4.



Figura 4.3 – Ensaio de resistência superficial pelo esclerómetro pendular em reboco na Torre do Jogo da Péla

Tabela 4.4 – Classificação da resistência mecânica superficial através do esclerómetro pendular modelo *Schmidt PT* (LNEC, 2016)

Intervalo de valores do ressalto [Vickers]	Classificação ordenada
[0; 20[Pobre
[20; 30[Média
[30; 40[Suficiente
[40; 55[Boa
[55; 75[Muito Boa
[75; 100]	Excelente

4.4.2 Resistência superficial por choque de esfera

O ensaio de choque de esfera permite avaliar a deformabilidade do material e, indiretamente, a sua coesão e aderência. Este ensaio efetuou-se com base na ficha de ensaio FE Pa 25 (LNEC, 1980). É realizado com recurso ao aparelho *Martinet-Baronnie* representado na Figura 4.4 (a). O corpo deste aparelho é colocado na posição horizontal perpendicular à parede que está a ser analisada e, de

seguida, deixa-se cair o braço do aparelho com 0,60 m de comprimento que possui na sua extremidade uma esfera de aço com 0,5 kg de massa e 50 mm de diâmetro. A esfera provoca um choque na superfície cuja massa é quantificada pelo seu diâmetro, medido com uma craveira (Figura 4.4b). Quanto menor for o diâmetro da massa maior será a resistência do material; em situações nas quais ocorram fissurações do material, dá indicação de que é menos deformável.



Figura 4.4 – Equipamento *Martinet-Baronnie* (a) e medição do diâmetro com craveira (b)

4.4.3 Absorção de água sob baixa pressão

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão com utilização de tubos de *Karsten* foi efetuado segundo os procedimentos indicados na norma EN 16302 (CEN, 2013a). Este ensaio avalia a permeabilidade do material através da quantidade de água absorvida durante um determinado período de tempo numa dada área de contacto, sob uma baixa pressão conferida por uma coluna de água. Os tubos de *Karsten* utilizados (Figura 4.5) têm uma graduação de 0 a 4 mL e, para o método de ensaio adotado, os tubos foram antecipadamente limpos de modo a remover algumas partículas soltas eventualmente presentes e de seguida fixados verticalmente na parede com recurso a plasticina resistente à água. A plasticina foi fixa na superfície do bordo dos tubos em contacto com a superfície a testar, sem excesso, de modo a deixar livre a área do material a ensaiar que está em contacto direto com a água. Depois de fixos, com a ajuda de um esguicho encheram-se os tubos até ao valor de 4 mL e deu-se início à contagem do tempo através de um cronómetro. Para manter constante a pressão, a altura teria de ser reposta, o que não foi feito, por simplificação.

O valor do resultado deste ensaio exprime-se na quantidade de água absorvida, W_i , em cada um dos locais de ensaio e pela respetiva média aritmética. A equação 4.1 exprime o cálculo da quantidade de água absorvida por unidade de área ao fim de um determinado período.

$$W_i = \frac{Q_i}{A}$$

Equação 4.1

W_i representa, em mL/cm², a porção de água absorvida por unidade de área no instante de tempo i , Q_i , em mL, a quantidade de água absorvida no instante i desde o começo do ensaio e A , em cm², exprime a área de abertura da superfície de contacto do tubo com o material ensaiado que tem o valor de 4,9 cm².

Com base na equação anterior é possível então determinar a quantidade de água absorvida por unidade de área num determinado período de tempo, desde o início até ao fim do ensaio, para cada um dos locais de ensaio.



Figura 4.5 – Tubos de Karsten colocados em parede do caso de estudo 1

4.4.4 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio da velocidade de propagação de ultrassons foi realizado pelo método indireto com base na ficha de ensaio FE Pa 43 (LNEC, 2015), permitindo avaliar as características do material ao nível de compacidade e porosidade. Para a execução do ensaio foi utilizado o equipamento *Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7* devidamente calibrado (Figura 4.6a). Este aparelho é constituído por dois transdutores de 45 kHz: um transdutor recetor e outro emissor. O transdutor recetor foi colocado no ponto em que se considerou zero e o transdutor emissor foi sendo colocado em cada ponto de cinco em cinco centímetros como consta na Figura 4.6b), a começar nos 10 cm e ao longo de 20 cm no total perfazendo uma leitura em três pontos diferentes para cada uma das duas superfícies ensaiadas no caso de estudo do Condomínio dos Terraços de Bragança: na réplica da muralha em taipa e na parede da muralha original exposta a Sul. Foram registados os valores de tempo, em microssegundos, da propagação das ondas entre o ponto zero e o ponto correspondente que o aparelho indica. A velocidade de propagação das ondas, em m/s, é calculada através do gráfico que relaciona os tempos de transmissão das ondas e a distância a que os transdutores se encontram. O inverso da linha de

tendência que resulta destes dois parâmetros corresponde a uma aproximação da velocidade que se pretende obter.

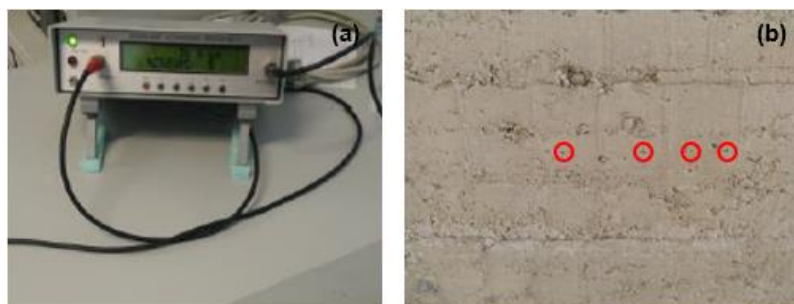


Figura 4.6 – Equipamento de ultrassons (a) e medições realizadas (b)

4.5 Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios químicos e mineralógicos

Concluída a campanha experimental anterior, relativa aos ensaios *in situ* e aos ensaios físicos e mecânicos, foi iniciada a última fase experimental com a seleção, divisão e preparação de amostras, condicionadas previamente, para a realização dos diversos ensaios de natureza química e mineralógica.

Nos casos de estudo em que foi possível aproveitar o material sobranante do corte das carotes utilizou-se aquele que se considerou em melhores condições para a execução dos ensaios desta natureza. Houve casos em que a amostragem, pela sua dimensão, não possibilitou a execução de ensaios físicos e mecânicos, mas que foi possível analisar química e mineralogicamente. Assim, foram ensaiados oito provetes de material proveniente das 10 carotes e um outro provete proveniente de uma amostra extraída por carotagem, mas com dimensão reduzida para os ensaios físicos e mecânicos, sendo exclusivamente utilizada nesta fase.

4.5.1 Preparação das amostras

Para se dar início a esta fase experimental, houve a necessidade de se proceder à preparação de provetes para os diferentes ensaios a executar. Para tal, em primeiro lugar, foram preparados os provetes para os ensaios de ATG/ATD e de DRX e, por último, para o ensaio de determinação de resíduo insolúvel em ácido (RI).

Na preparação dos provetes para a análise nos ensaios de ATG/ATD, DRX e RI foi necessária a separação das amostras em três frações distintas – amostra desagregada, fração fina e fração global.

Para o processo de obtenção da fração fina foram necessários um martelo de borracha e plástico, martelo de metal, escopro, pincel, espátula, colher e um peneiro com abertura de malha de 106 µm (ASTM C136/C136M, 2014). Primeiramente, foi feita a desagregação com o auxílio do martelo de plástico e borracha, com muito cuidado, para separar a pasta do ligante da amostra através de algumas

pancadas pouco forçadas e suaves, movimentos de rotação, pressão e fricção, de modo a aproveitar o material ligante (cerca de 2 g) e não quebrar material agregado (Figura 4.7a). De seguida, fez-se passar a amostra desagregada pelo peneiro (Figura 4.7b). A fração fina foi então obtida e depois devidamente armazenada dentro de um saco pequeno identificado com a designação do provete a que corresponde. O material retido no peneiro, correspondente aos agregados, foi guardado.

A preparação da fração global teve início com a moagem em moinho de bolas de uma porção representativa de cerca de 20 g do total da amostra (Figura 4.8a) e em alguns casos, antes de colocar no equipamento de moagem, recorreu-se ao martelo para partir a amostra em fragmentos. Em seguida fez-se passar o material moído pelo peneiro com abertura de malha de 106 μm e o que ficou retido foi novamente moído em almofariz de porcelana (Figura 4.8b), repetindo-se este processo consecutivamente até que a totalidade da amostra passasse no peneiro. A fração global obtida desta forma foi homogeneizada com recurso a uma espátula e guardada devidamente em saco de plástico e identificada (Figura 4.8c).

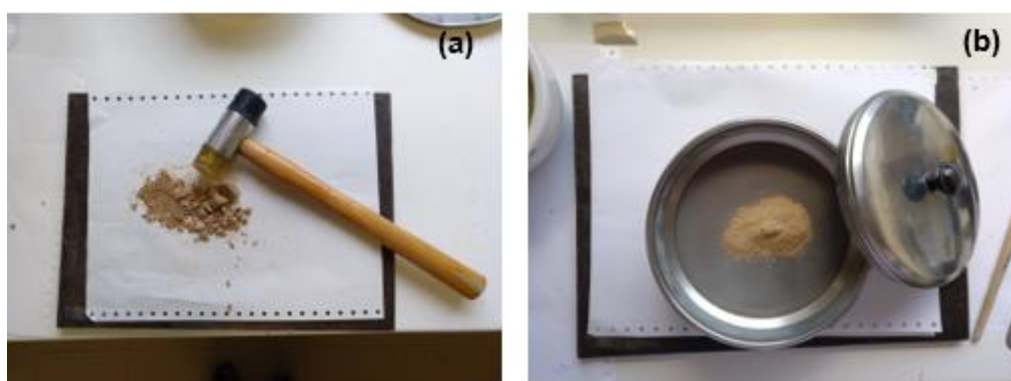


Figura 4.7 – Preparação da fração fina para DRX: (a) desagregação da amostra e (b) amostra por peneirar

De modo a não ocorrerem contaminações entre diferentes amostras, todo o material utilizado foi lavado entre preparações e devidamente condicionado em local apropriado para o efeito.

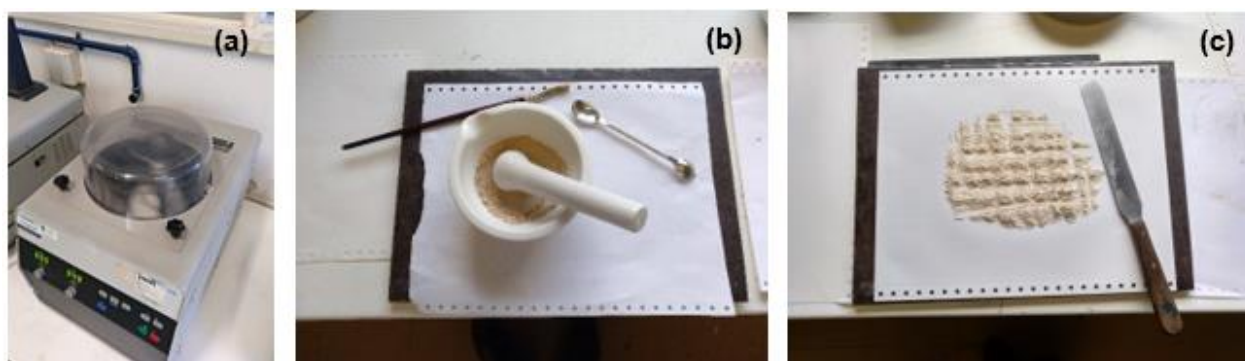


Figura 4.8 – Preparação da fração global: (a) moagem com moinho de bolas *RETSCH S100* e (b) com almofariz e pilão com homogeneização da fração global em (c)

4.5.2 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

A análise por difração de raios X (DRX) consiste na identificação de compostos cristalinos que se encontram presentes na amostra em pó, baseando-se na incidência de um feixe de monocromático de raios X nesse mesmo material, sendo esses raios difratados pelos cristais segundo determinadas direções. Esta técnica, muito utilizada para a identificação dos compostos mineralógicos, possibilita obter informação acerca dos compostos cristalinos presentes, uma vez que os átomos destes compostos se encontram dispostos numa rede tridimensional com distâncias reticulares da mesma ordem e grandeza de comprimentos de onda dos raios X.

A difração dos raios X só ocorre quando se verifica a lei de Bragg (equação 4.2):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Equação 4.2}$$

Nesta equação, n é um número inteiro, λ é o comprimento de onda do raio X, d , em Å, é a distância interplanar entre planos cristalinos que depende, obviamente, de cada substância, e θ , em °, corresponde ao ângulo de incidência do feixe de radiação.

Na análise de DRX foram utilizadas as duas frações da amostra: a fina para a determinação da composição mineralógica do ligante e eventualmente outros compostos, como materiais pozolânicos, sais e/ou produtos de alteração, e a fração global onde para além dos compostos da pasta do ligante estão os agregados.

No ensaio de DRX, a amostra foi colocada no porta-amostras metálico presente na câmara do equipamento de análise. O enchimento foi faseado, compactando-se sempre a amostra nas várias camadas delgadas que foram sendo introduzidas até ao preenchimento completo do porta-amostras. Foi utilizada uma espátula para colocar a amostra, um peso para se fazer a compactação e uma lâmina e pincel para retirar e limpar eventuais excessos de amostra.

Para a realização do ensaio foi utilizado um difratómetro Philips PW3710 (Figura 4.9), tendo o registo de DRX sido obtido nas seguintes condições: tensão de 35 kV e corrente de filamento de 45 mA, utilizando-se a radiação $K\alpha$ do Co com comprimento de onda de 1,7903 Å. O resultado da difração obtém-se sob a forma de espectros de difração denominados por difratogramas registados entre 3° e 74° 2 θ com uma velocidade de varrimento de 0,05° 2 θ /s.



Figura 4.9 – Difratómetro de raios X Philips PW3710

4.5.3 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)

A análise termogravimétrica (ATG) é um ensaio que permite avaliar as perdas e ganhos de massa dum material ao longo do tempo através do aquecimento (ou arrefecimento) a uma velocidade constante. Estas variações de massa estão associadas aos processos de desidratação, desidroxilação e descarbonatação que ocorrem em diferentes intervalos de temperatura (T) específicos, sendo possível identificar desta forma um determinado composto na amostra. Em simultâneo, é comum complementar-se a ATG, com a sua derivada dTG (análise termogravimétrica diferencial), que permite visualizar com maior rigor e precisão o início e fim das variações de massa, quantificando desta forma o mais completo possível os compostos identificados.

A análise térmica diferencial (ATD) é uma outra técnica que mede a diferença entre a temperatura da amostra em análise e um material que não sofre qualquer alteração na gama de temperatura em ensaio.

Os resultados do ensaio são representados sob a forma de termogramas (TG) – gráfico com a indicação da temperatura, em °C, no eixo das abcissas e a variação da massa, em %, no eixo das ordenadas. Neste gráfico são também identificadas as curvas de dTG e ATD.

Com a ATG/dTG/ATD é possível determinar o teor de carbonato de cálcio presente nas amostras, a partir da perda de massa que ocorre na gama de temperatura entre os 550-900 °C e que corresponde à descarbonatação do CaCO_3 através da equação 4.3.

$$\text{teor de } \text{CaCO}_3 = \text{pm}_{550-900} \times \frac{\text{MM}_{\text{CaCO}_3}}{\text{MM}_{\text{CO}_2}} \quad \text{Equação 4.3}$$

Nesta equação, $\text{pm}_{550-900}$ representa a perda de massa no intervalo de temperaturas de 550-900 °C e $\frac{\text{MM}_{\text{CaCO}_3}}{\text{MM}_{\text{CO}_2}}$ corresponde à razão molar entre os compostos envolvidos na reação de descarbonatação.

O ensaio de ATG foi realizado com recurso a um analisador *SETARAM TGA 92* (Figura 4.10b), sob atmosfera inerte de argón (3 l/h) com velocidade de aquecimento uniforme de 10 °C/min desde a temperatura ambiente até aos 1000 °C. Este ensaio foi realizado apenas para a fração global de cada amostra.

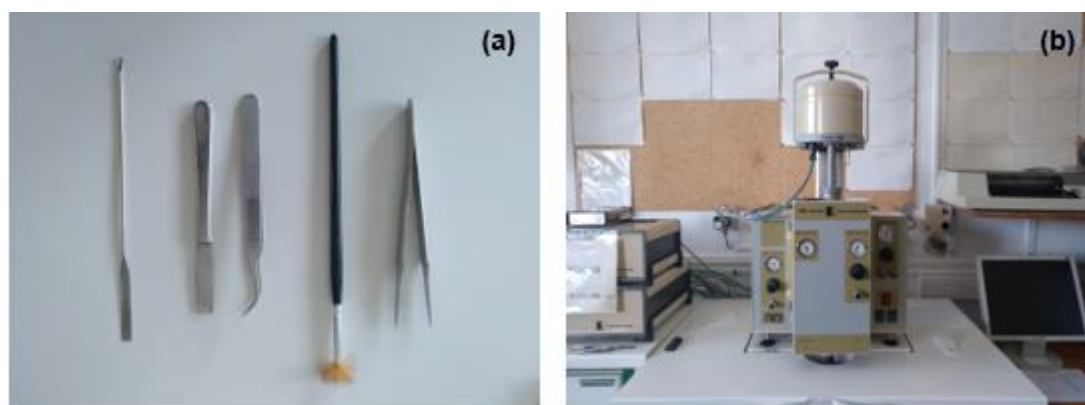


Figura 4.10 - Material utilizado na colocação da amostra (a) e equipamento ATG/dTG/ATD (b)

4.5.4 Determinação do resíduo insolúvel em ácido e observação visual

A determinação do resíduo insolúvel em ácido traduz a quantidade, em %, de areia siliciosa nas amostras, o qual resulta do ataque à amostra de uma solução 1:10 de ácido clorídrico (HCl).

O ensaio foi realizado na amostra desagregada, ou seja, as amostras submetidas a este ensaio foram preparadas sempre com o cuidado e o objetivo de não partir os agregados existentes. Durante a desagregação das amostras os grãos de agregado calcário e/ou de conchas foram retirados manualmente, fazendo-se no final a sua pesagem, como indicado na Figura 4.11 (a). Foi feita também uma observação visual cuidadosa, registando a consistência, existência de nódulos de cal, carvão, material cerâmico, fibras vegetais, entre outros materiais.

A massa total de agregado presente nas amostras foi obtida pela pesagem do material resultante do ataque ácido adicionada da dos constituintes calcários (Figura 4.11b).

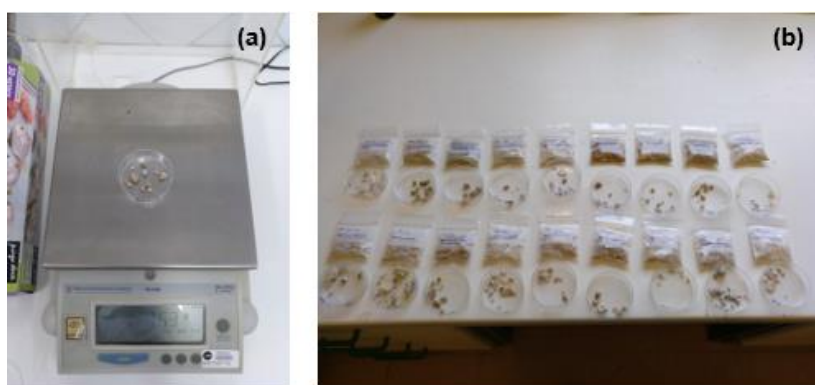


Figura 4.11 – Pesagem dos constituintes (a) aspeto das frações obtidas após ataque ácido (b)

Previamente ao ataque, as amostras foram colocadas em caixas de vidro para serem secas em estufa a uma temperatura de 105 °C durante pelo menos 12 h, e foram também preparados cadinhos para a filtração, sendo estes também colocados em estufa nas mesmas condições que as caixas de vidro.

A fração desgredada foi submetida ao ataque ácido segundo o procedimento interno do LNEC para argamassas antigas. Também os agregados de calcário e/ou conchas, resultante da separação manual, foram submetidos a um ataque controlado com uma solução de 30 ml de H₂O + 10 ml de HCl (1:10) para evitar a decomposição e “limpar” os vestígios de ligante aderente (Figura 4.12a).

O ataque da amostra desgredada consistiu em adicionar, por períodos de tempo de alguns segundos, uma solução de 50 mL de ácido clorídrico diluído HCl (1:10) (100 mL de HCl em 1000 mL de água destilada) e 50 mL de água destilada, repetidamente de forma a controlar a dissolução do ligante (Figura 4.12b).



Figura 4.12 – Preparação das soluções de ataque (a), agitação e ataque ácido da amostra (b)

Após ataque, procedeu-se à filtragem do resíduo usando cadinhos de Gooch (Figura 4.13) com recurso a uma bomba de vácuo, o qual foi lavado com água destilada de forma a que não ficassem retidas impurezas no copo de precipitação.

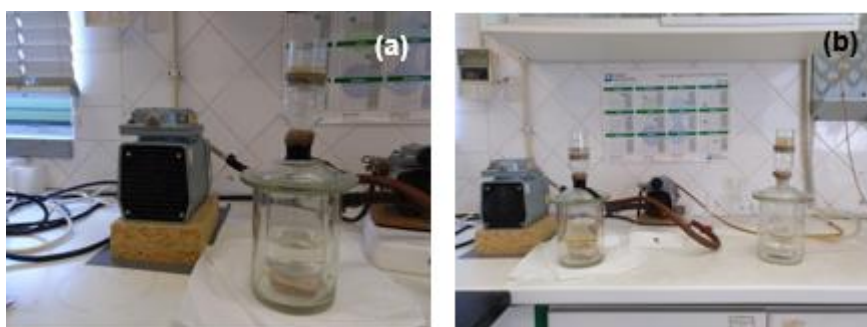


Figura 4.13 – (a) e (b) Filtragem do resíduo insolúvel em bomba de vácuo

O teor de areia siliciosa (RI) foi calculado com base na equação 4.4 e posteriormente procedeu-se também ao cálculo do teor de agregado total da amostra, tendo em conta a equação 4.5.

$$RI = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 4.4}$$

Nesta, m_f e m_i representam, em g, respetivamente a massa final (de resíduo) e a massa inicial de amostra sem agregado calcário, sendo o RI expresso em %.

$$\text{teor de agregado na amostra} = RI + \text{fração de agregado calcário} \quad \text{Equação 4.5}$$

4.5.5 Análise granulométrica do resíduo do ataque ácido

Posteriormente ao cálculo do RI procedeu-se à sua análise granulométrica. Por esta razão, e embora este ensaio seja físico, é apresentado na sequência dos químicos. Uma vez que para cada

amostra se efetuou o ensaio em duplicado, juntaram-se as frações assim obtidas e efetuou-se a separação granulométrica, durante 10 minutos, com recurso a um equipamento de agitação de peneiros da marca RETSCH (Figura 4.14) com uma coluna de peneiros da série ASTM indicada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Série ASTM de peneiros utilizada para a separação granulométrica

Nº do peneiro	Abertura da malha [mm]
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,6
50	0,3
100	0,15
200	0,075



Figura 4.14 – Equipamento de agitação de peneiros RETSCH para a separação granulométrica do agregado

Após o processo de agitação procedeu-se ao traçado das curvas granulométricas para cada um dos provetes analisado que pode ser analisado no Anexo A3 e A5.

4.6 Metodologia e procedimentos experimentais dos ensaios físicos e mecânicos

Estes ensaios foram realizados em todos os 16 provetes obtidos após o corte das carotes. Antes do início desta fase, e como o corte das carotes foi efetuado com equipamento em contacto com a água, os provetes foram secos em estufa a uma temperatura de 40 °C durante três dias até ao início do ensaio.

4.6.1 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é um ensaio que permite avaliar a resistência que um material homogêneo quando atravessado pelo calor, mas também permite ter uma percepção da sua compacidade. A condutibilidade térmica foi obtida com recurso à utilização do aparelho *ISOMET 2014 – Heat Transfer Analyser* (Figura 4.15a) e as leituras da condutibilidade foram efetuadas com a sonda plana *API 210412* com 60 mm de diâmetro (Figura 4.15b). Na Tabela 4.6 estão presentes as características da sonda utilizada. O ensaio da condutibilidade térmica foi executado de acordo com o manual de utilização do referido equipamento. Os provetes foram todos ensaiados da mesma forma em condições de T de 21 ± 2 °C e HR de 55 ± 5 %.

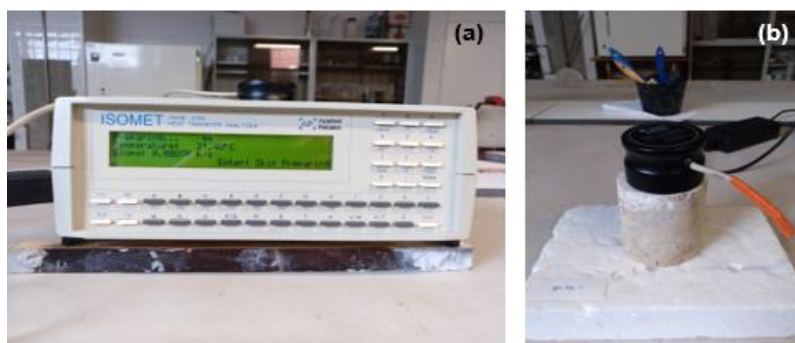


Figura 4.15 – Equipamento de medição ISOMET 2014 (a) e sonda API 210412 (b)

Tabela 4.6 – Características da sonda de superfície utilizada na medição dos valores de condutibilidade térmica

Tipo de sonda	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	Capacidade térmica volumétrica [J/(m³.K)]	Temperatura [°C]
API 210412	0,30 – 2,0	$1,5 \times 10^6$ a $4,0 \times 10^6$	-15 a +50

Nos oito provetes que têm na sua constituição argamassa e pedra calcária irregular, por vezes a constituição varia muito em cada face. Assim o ensaio de condutibilidade térmica foi feito tanto na face com mais calcário como na face com mais argamassa para verificar a possibilidade de eventuais diferenças significativas de resultados e obter um valor mais fiável, uma vez não se tratar de material homogêneo.

4.6.2 Dureza superficial através do durómetro

A avaliação da dureza superficial dos provetes foi realizada com o durómetro do tipo Shore A. A determinação deste parâmetro foi executada segundo a norma ASTM D2240–05 (ASTM, 2010) e a ficha de ensaio Fe Pa 49.1 (LNEC, 2016). O ensaio consiste em colocar o durómetro sob a superfície do material a ensaiar como indicado na Figura 4.16. Este é constituído por um pino que se encontra na

extremidade que, quando pressionado perpendicularmente contra a superfície através de uma mola, regista num mostrador a resistência à penetração numa escala de 0 a 100 graus Shore A.



Figura 4.16 – Ensaio de dureza superficial com durómetro Shore A

Dada a diversidade de materiais, mais evidente nos provetes de argamassa e pedra calcária irregular do que nos de taipa, optou-se por realizar leituras em vários pontos de ambas as faces de todos os provetes de forma a melhorar a estatística das medições.

4.6.3 Massa volúmica aparente

O ensaio da massa volúmica foi realizado pelo método geométrico. O ensaio foi executado com base na norma alemã DIN 18946 (DIN, 2013) e na norma NP EN 1936 (IPQ, 2008) com os provetes em condições de T e HR de 21 ± 2 °C e 55 ± 5 %, respetivamente. Dada a geometria cilíndrica dos provetes foi possível adotar este método fazendo a medição da altura e diâmetro dos provetes com o auxílio de uma craveira digital (Figura 4.17a, b) e a sua pesagem através de uma balança de precisão de 0,001 g (Figura 4.17c). A massa volúmica aparente para cada provete (em kg/m³) é obtida pelo valor do quociente da massa (em kg) pelo respetivo volume (em m³).

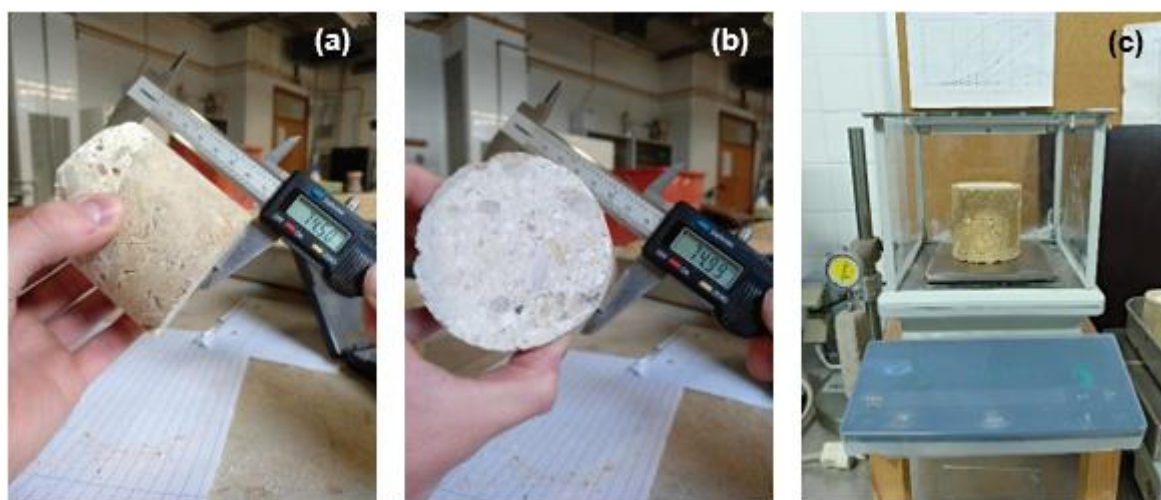


Figura 4.17 – Ensaio de determinação da massa volúmica: (a) medição da altura; (b) medição do diâmetro e (c) pesagem do provete

4.6.4 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico, E_d , fornece informação do material acerca da sua deformabilidade. Foi realizado por frequência de ressonância baseado na norma NP EN 14146 (IPQ, 2006). O módulo de elasticidade foi obtido recorrendo ao equipamento *Zeus Resonance Meter* presente na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Equipamento de medição do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade, E_d , é determinado através da medição de uma frequência de ressonância longitudinal ao longo do comprimento do provete a ensaiar. No *software* de cálculo são também introduzidas as dimensões e a massa de cada provete correspondente. Todos os 16 provetes cilíndricos foram analisados neste ensaio, sendo que, previamente, teve de ser feito um ajuste geométrico visto o programa de cálculo estar formatado para provetes prismáticos retangulares ou quadrangulares e não cilíndricos, como é o caso. Para isso fez-se o cálculo do parâmetro que se designa por b , em mm, que corresponde nos provetes prismáticos à distância horizontal e vertical, c_1 e c_2 respetivamente, da face que está em contacto com o emissor, como se pode verificar na Figura 4.19.

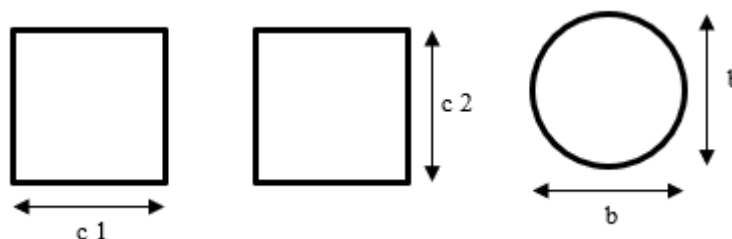


Figura 4.19 – Ajuste geométrico para obtenção do parâmetro b dos provetes

Assim, os parâmetros c1 e c2 foram substituídos por b no software de cálculo (equação 4.6).

$$A_{\text{face provete}} = \frac{\pi \times \phi^2}{4} = b^2 \quad \text{Equação 4.6}$$

A, em mm², representa a área da face do provete em contacto com o emissor, ϕ é o diâmetro da face do provete, em mm, e b, em mm, é o parâmetro calculado para ser introduzido no programa de cálculo.

Introduzidos os valores no *software* para cada provete, colocou-se o provete no suporte existente no equipamento com uma das faces voltada para o emissor, onde, através do envio e da receção de vibrações longitudinais, o programa associa e regista uma frequência de ressonância e calcula automaticamente o módulo de elasticidade com base na equação 4.7. Cada provete foi ensaiado em dois pontos distintos em ambas as faces de modo a ter uma maior abrangência de resultados.

$$E_d = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 4.7}$$

E_d o módulo de elasticidade, em MPa, l representa o comprimento do provete, em m, f_0 é a frequência de ressonância longitudinal emitida, em Hz, ρ corresponde, em N/m³, ao peso volúmico do material a ser ensaiado e g representa a aceleração da gravidade, em m/s², e toma o valor de 9,8 m/s².

Com cada provete realizaram-se entre 4 a 8 medições. O valor do módulo de elasticidade calculado para cada provete corresponde à média aritmética dos vários valores registados.

4.6.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base na norma EN 15801 (CEN, 2009). Previamente ao início do ensaio, as faces laterais dos provetes foram impermeabilizadas com uma mistura de cera e pez de louro de modo a assegurar desta forma o sentido ascendente e unidirecional e sem perdas por evaporação pelas superfícies laterais. Os provetes foram separados em virtude da sua constituição, isto é, foram colocados os provetes de pedra irregular calcária argamassada e taipa em tabuleiros separados. De seguida os tabuleiros foram colocados dentro de tabuleiros em duas caixas de polietileno estanques (Figura 4.20a), com ambiente saturado em humidades. Nos tabuleiros nivelados tinha sido introduzida uma lâmina de água com cerca de 3 mm

de altura. Sempre que necessário foi adicionada água de modo a estabelecer a altura de água inicial. O ensaio foi realizado em sala condicionada com T de 20 ± 2 °C e HR de 65 ± 5 %.

Nos provetes de argamassa e pedra irregular foi feita uma divisão das faces colocadas em contacto com a água: cinco provetes com a face maioritariamente de calcário e quatro com a face maioritariamente de argamassa para posteriormente discussão dos resultados obtidos face à capacidade de absorção dos diferentes materiais.

A determinação da diferença de massas foi efetuada com a utilização de uma balança com precisão de 0,001 g (Figura 4.20b). As pesagens foram feitas desde o instante inicial até aos primeiros 15 minutos de 5 em 5 minutos, de seguida aos 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 min. A partir daí a cada 24 h, perfazendo um total de 13 dias.

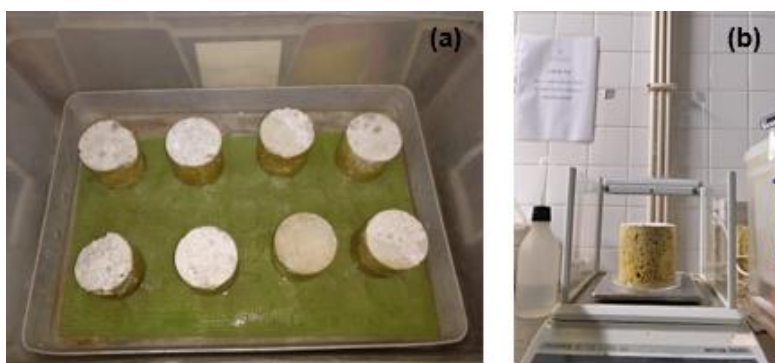


Figura 4.20 – Ensaio de absorção capilar: (a) tabuleiro com os provetes de ensaio e (b) pesagem do provete no instante de tempo i

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade são expressos em função da curva de absorção capilar de água, em que, graficamente, o eixo das abcissas corresponde à raiz quadrada do tempo em minutos, $\text{min}^{1/2}$, e nas ordenadas é apresentada a quantidade de água absorvida por unidade de área, em kg/m^2 , que é calculada com base na equação 4.8.

$$Q_i = \frac{m_i - m_0}{A} \quad \text{Equação 4.8}$$

Q_i , em kg/m^2 , corresponde à quantidade de água absorvida no instante de tempo i , m_i e m_0 , em kg, correspondem à massa do provete ao fim do instante de tempo i e massa do provete seco no tempo t_0 , respetivamente. O parâmetro A diz respeito à área, em m^2 , da face do provete em contacto direto com a água ($A = \frac{\pi \times \phi^2}{4}$).

Através das curvas de capilaridade é possível avaliar o comportamento dos provetes e calcular o coeficiente de absorção capilar (C_c), expresso em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$, que corresponde ao declive do segmento de reta mais representativo na fase inicial do ensaio de cada provete.

4.6.6 Secagem

Após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu-se o ensaio de secagem. O ensaio foi executado de acordo com a norma EN 16322 (CEN, 2013b) e nas mesmas condições de T e HR do ensaio anterior. Os provetes foram dispostos em tabuleiros estanques em posição inversa à do ensaio de absorção de água por capilaridade, ou seja, a face que tinha estado em contacto com a água ficou virada para cima de forma à água evaporar pela mesma superfície por onde tinha sido absorvida, e a base ficou totalmente em contacto com o tabuleiro metálico. Como as superfícies laterais estavam impermeabilizadas, a secagem ocorreu apenas pela área superior.

As pesagens dos provetes foram efetuadas com recurso a uma balança de precisão de 0,001 g e ao fim de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas. Posteriormente, as medições foram efetuadas a cada 24 h, até os provetes apresentarem massa constante (Figura 4.21).



Figura 4.21 – Ensaio de secagem

Os resultados do ensaio de secagem traduzem a perda de água dos provetes ao longo de um determinado período de tempo. Estes resultados apresentam-se através das curvas de secagem em dois tipos de gráficos distintos, que permitem observar as duas fases de secagem. O primeiro, a partir do qual se calcula a taxa de secagem na fase 1 (TS1), indica a quantidade de água perdida por unidade de área, em kg/m^2 , no eixo das ordenadas, em função do tempo no eixo das abcissas, em h; no segundo gráfico, a partir do qual se calcula a taxa de secagem na fase 2 (TS2) a diferença é que o eixo das abcissas apresenta-se em função da raiz quadrada do tempo, em $\text{h}^{1/2}$. A TS1 fornece a secagem na fase inicial do ensaio onde a água no estado líquido é deslocada desde o interior até à superfície do provete, sendo determinada através do declive (negativo), por regressão linear, do troço reto no início da curva. Da mesma forma a TS2 também é determinada com o declive (negativo) no troço reto (intermédio) do segundo gráfico correspondendo maioritariamente ao fenómeno de difusão de vapor de água (Brito et al., 2011).

4.6.7 Resistência à compressão diametral

Para avaliar as condições de resistência à compressão dos provetes foram adotados os procedimentos de ensaio presentes na norma BS 1881: Part 117 (BSI, 1983), também designado por ensaio Brasileiro ou Splitting test. Os provetes foram previamente colocados em estufa a 40 °C durante três dias e depois permaneceram quatro dias em condições estáveis de T e HR de 20 ± 2 °C e 65 ± 5 %, respetivamente até ao início do ensaio. O ensaio consiste em avaliar a resistência à compressão de uma forma indireta, colocando o provete na posição horizontal e centrado de forma a ser carregado à compressão diametral (Figura 4.22a). Na parte superior e inferior do provete cilíndrico foram colocadas duas tiras de madeira, como ilustrado na Figura 4.22 (b) de forma a manter a estabilidade do provete e garantir o bom contacto entre os pratos da prensa e o provete.



Figura 4.22 – Esquema do ensaio de compressão diametral (a); pormenor que mostra as tiras de madeira utilizadas na parte superior e inferior dos provetes (b)

O critério de escolha das dimensões dos provetes consideradas para este ensaio foi baseado nos estudos efetuados por Araki et al. (2016) com provetes de taipa, que usaram provetes circulares com a altura igual ao diâmetro. Os provetes analisados no presente trabalho possuem dimensões de ~75 mm para o diâmetro e altura. De salientar que sendo este o único ensaio destrutivo da campanha experimental laboratorial, todos os restantes ensaios anteriores foram avaliados com estas mesmas dimensões.

Com o auxílio do equipamento de tração Zwick – Rowell Z050 e a uma velocidade de 0.025 mm/min o ensaio decorreu fazendo o carregamento vertical até levar à rotura do provete. A tensão de tração é obtida com base na teoria da elasticidade (equação 4.9).

$$\sigma_{ts} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad \text{Equação 4.9}$$

Nesta, σ_{ts} representa a tensão de tração, em N/m², F a força máxima, em N, na qual o provete atingiu a rotura, o l corresponde ao comprimento (altura) do provete e também à largura da faixa de madeira pela qual a força é distribuída, em mm, e d, em mm também, representa o seu diâmetro.

5 Resultados e discussão

5.1 Considerações gerais

No presente capítulo são analisados todos os resultados obtidos durante a campanha experimental. Os resultados são correlacionados e comparados com resultados encontrados na pesquisa bibliográfica de estudos realizados por outros autores com materiais que se assemelham aos analisados e utilizando ensaios semelhantes aos descritos no Capítulo 4 do presente trabalho.

No Anexo A1 encontra-se a análise visual preliminar feita às amostras que foram recolhidas e nos Anexos A2 a A5 estão apresentadas tabelas com os resultados de todos os ensaios realizados. No Anexo A3, em particular, está presente uma ficha para cada caso de estudo com um resumo dos resultados correspondentes a cada provete ensaiado.

5.2 Resultados da análise visual

Anteriormente à realização da campanha laboratorial, e posteriormente à recolha das amostras, foi realizada uma avaliação visual das amostras recolhidas e também sobre o estado de conservação de alguns dos locais visitados. A descrição visual dessas amostras detalha, de uma forma geral, parâmetros como a cor, forma, tipo de agregados que as compõem, bem como outros aspetos particulares, tais como as dimensões e consistência.

No caso de estudo 4 - Escola Básica e Secundária Gil Vicente - as amostras extraídas mecanicamente revelaram no seu núcleo interior alguns agregados cerâmicos de cor avermelhada e areias siliciosas, inseridos na alvenaria de pedra calcária irregular com argamassa aparentemente de cal aérea, como consta na análise presente no Anexo A1.



Figura 5.1 - Troço de taipa da muralha no caso de estudo 4 (Muralha e Cubelos Escola Básica e Secundária Gil Vicente): (a) aspeto da superfície com desagregação do reboco e (b) identificação de camadas de taipa com diferente coloração e degradação

Pela análise visual dos paramentos (Figura 5.1) foi possível prever que a terra da taipa foi estabilizada com cal aérea, uma vez que se observou a presença de nódulos brancos, friáveis, muito dispersos na matriz de taipa que se encontrava à superfície do paramento analisado. A estabilização da taipa com a adição de cal aérea foi uma técnica muito comum em estruturas de defesa militar em Portugal, como é exemplo o Castelo de Paderne analisado por Parracha et al. (2019).

Num nicho no paramento de taipa, o reboco encontrava-se bastante erodido superficialmente, apresentando até algumas lacunas com dimensões significativas causadas pela sua desagregação por falta de coesão, provavelmente por lavagem do ligante (cal), deixando mais exposta a taipa (Figura 5.1). Ambas as carotes extraídas do paramento em taipa vieram confirmar a utilização desta técnica construtiva e podem ser observadas detalhadamente no Anexo A1.

No caso de estudo 5 – Palácio da Rosa - visualmente foi notória a presença de diferentes características de construção, incluindo as fundações da estrutura assentes em substrato geológico e um túnel escavado no interior da muralha. Na Figura 5.2 é possível identificar estas técnicas de construção com a presença de alvenaria de pedra irregular argamassada muito exposta às ações atmosféricas e também ao crescimento da vegetação.



Figura 5.2 - Troço da muralha no Palácio da Rosa (caso de estudo 5): (a) parede inserida num dos pátios do palácio e (b) alvenaria de pedra irregular argamassada

No caso de estudo 6 – Corpo Santo Hotel - a torre do século XIV aparenta ter sido intervencionada com argamassas nas ações mais recentes de conservação. Este facto foi comprovado pelas amostras retiradas mecanicamente no topo da torre, muito diferentes das extraídas nos outros casos de estudo.

Na inspeção efetuada no condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7) foi possível observar um dos melhores troços da muralha com diferentes elementos, desde paredes principais (Figura 5.3a) e uma torre – Torre do Conde de Vimioso (Figura 5.3b). Esta última apresenta uma base onde o suporte de fundação está muito exposto (Figura 5.3c). No nível superior da torre é facilmente identificada a alvenaria de pedra regular empregue. A parede principal da muralha orientada a Oeste apresenta mais de 20 m de extensão e não se teve acesso dada a reabilitação que se encontrava a decorrer num edifício na sua retaguarda. Funciona como contenção de terras, onde está fundado o edifício adjacente. A outra parede principal, orientada a Sul, com cerca de 10 m de comprimento, apresenta fraca coesão do material, grande irregularidade na espessura (Figura 5.3d), eflorescências

e presença de desenvolvimento biológicos. Esta parte encontra-se coberta pelo piso vazado de um dos edifícios do complexo, sem incidência direta da radiação solar, desenvolvendo um microclima próprio e aparentemente bastante húmido. Existem também pequenos vestígios da continuidade da muralha, a Oeste e Este, com cerca de 10 m de comprimento. Inserido na construção do Condomínio, foi efetuada a construção de uma réplica (Figura 5.3e) da muralha em taipa estabilizada com cal aérea (Varandas, 2004) seguindo a continuidade Este-Oeste da estrutura original (Figura 5.3f), com cerca de 10 m de extensão, também ela coberta pelo piso vazado de um dos edifícios.



Figura 5.3 - Troços da muralha no Terraços de Bragança (caso de estudo 7): (a) paredes principais a Oeste; (b) torre Conde Vimioso; (c) forte exposição da base de fundação da torre; (d) parede principal a Sul; (e) ao fundo, réplica em taipa da muralha e (f) continuidade Este-Oeste da muralha original

No Anexo A1 encontra-se a tabela com a análise visual detalhada efetuada às diferentes amostras.

5.3 Resultados da caracterização *in situ*

5.3.1 Resistência superficial pelo esclerómetro pendular

A realização do ensaio de esclerómetro pendular permitiu obter resultados em três casos de estudo: 1, 3 e 7.

No caso de estudo 1 – Torre do Jogo da Péla - os resultados (Figura 5.4) mostram os valores obtidos para as diferentes zonas das paredes interiores analisadas a Oeste, Este e Norte. Estes valores revelaram diferentes tendências em função da zona de reboco de argamassa de cal analisada, sendo a média de valores compreendida entre os 63-69 Vickers. Face aos valores obtidos por Faria et al. (2013) em superfícies rebocadas com argamassa de terra argilosa de diferentes traços, os resultados do caso de estudo 1 são ligeiramente inferiores. Para o caso de estudo 3 – Palácio da Independência – dada a forte exposição dos materiais e a fraca coesão dos paramentos, o ensaio decorreu sobre vários encasques e argamassas de preenchimento no paramento orientado a Sul, sendo os resultados de resistência (Figura 5.5) no geral muito baixos, podendo afirmar-se que, com exceção do nível superior da parede (73,3 Vickers), as restantes zonas analisadas têm uma fraca resistência superficial.

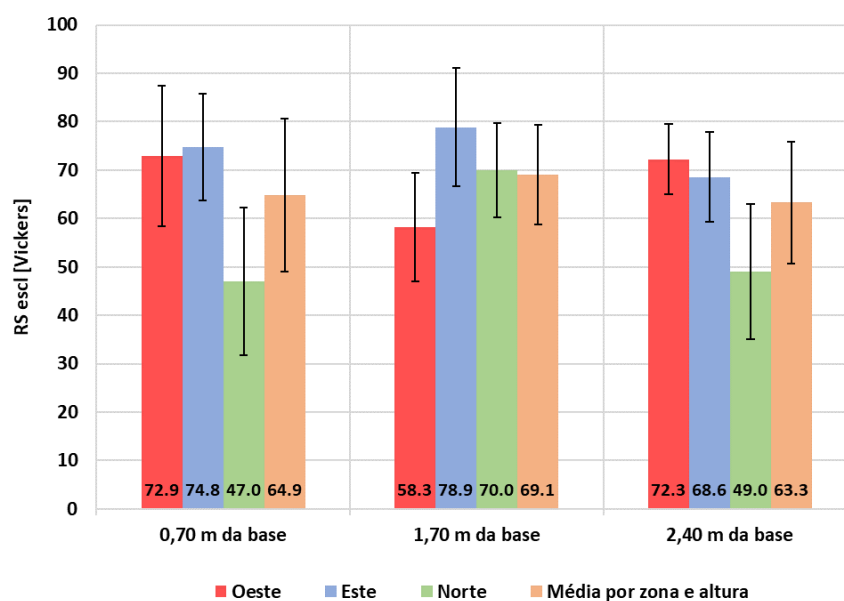


Figura 5.4 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos nas paredes interiores da Torre do Jogo da Péla (caso de estudo 1)

No Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7) o ensaio foi realizado em três superfícies diferentes de taipa: na réplica da muralha executada, segundo Varandas (2004), com terras do local e adição de cal hidratada; nas superfícies expostas da muralha a Sul e a Este. Na Figura 5.6 apresentam-se os valores obtidos, observando-se que em duas superfícies expostas a Este, original e réplica, os valores são da mesma ordem: 56 Vickers. A base e o nível superior virados a Sul apresentam igualmente valores semelhantes, com 70 – 73 Vickers, apresentando a réplica um valor menor, induzindo compatibilidade com a muralha original. Relativamente aos resultados de Cotrim Coradinho (2018) referentes à taipa do Castelo de Paderne, são da mesma ordem de valores dos obtidos no presente caso de estudo.

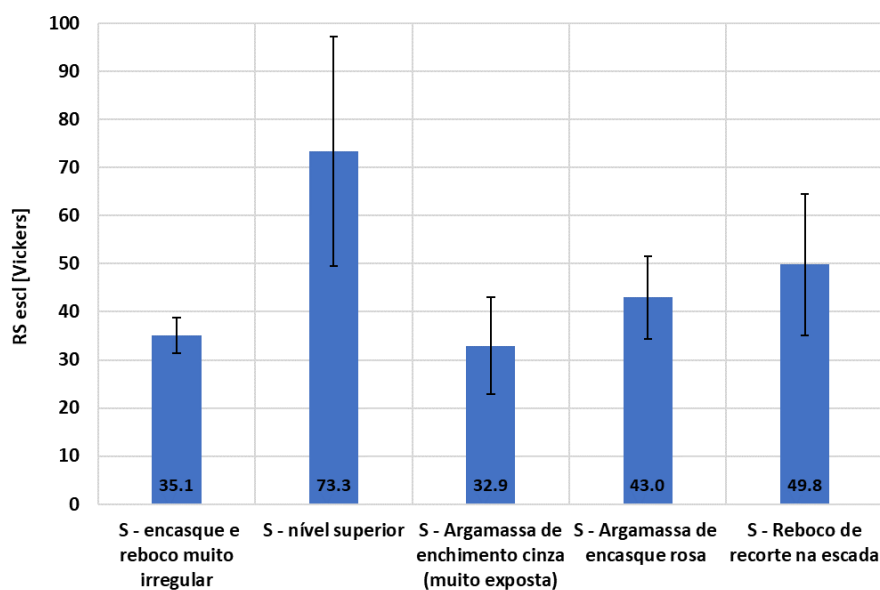


Figura 5.5 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos no paramento da Muralha orientado a Sul no Palácio da Independência (caso de estudo 3)

Embora as secções da Muralha dos casos de estudo 1 e 3 apresentem, na sua maioria, alvenaria de pedra argamassada, constata-se que os do caso de estudo 7, em taipa, são pouco diferentes. No global estes resultados são bastante superiores aos valores médios obtidos por Santos et al. (2019) em argamassas de reboco à base de terra com valores médios compreendidos em 35 – 45 Vickers para diferentes suportes. Esta característica do material também pode ser avaliada com o esclerómetro de Schmidt, utilizado em provetes de taipa por Bui (2017), revelando resultados de resistência superficial muito superiores aos apresentados no presente estudo.

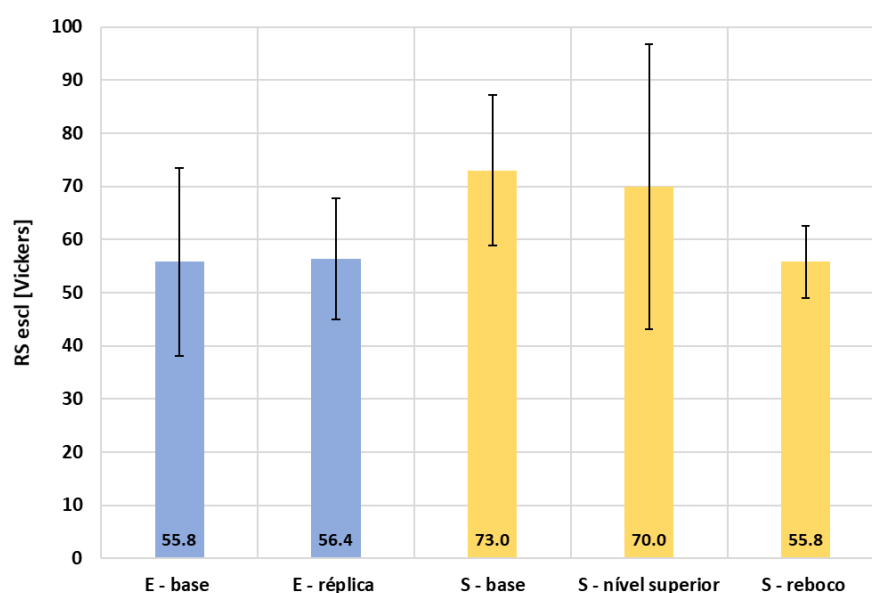


Figura 5.6 - Valores da resistência superficial por esclerómetro obtidos em vários locais no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7)

5.3.2 Resistência superficial por choque de esfera

Os ensaios de resistência superficial por choque de esfera, utilizando o equipamento de *Martinet-Baronnie*, foram executados, à semelhança do ensaio anterior, nos casos de estudo 1 (Torre Jogo da Péla) e 7 (Condomínio Terraços de Bragança).

Os valores do diâmetro da concavidade resultante do impacto da esfera para o caso 1 (Figura 5.7) foram obtidos nas mesmas três paredes do ensaio anterior a duas alturas da base, tendo revelado valores entre 10,6 e 13 mm sem ocorrência de fissuração pelo impacto. Um facto que se pode observar na análise dos resultados é que na cota superior os valores da massa são superiores aos da cota inferior, exceto no paramento Norte. Tal sugere uma resistência maior do reboco na parte mais baixa do núcleo interior da torre. Veiga et al. (2009) avaliaram a resistência mecânica superficial de painéis de reboco de argamassas de cal aérea e cal hidráulica numa fortaleza, obtendo valores superiores, entre os 18 e 21 mm de diâmetro, provando que essas argamassas tinham menor resistência em comparação com as deste caso de estudo.

No caso de estudo 7 apenas foi possível ensaiar a superfície da réplica da muralha a 20 cm e a 60 cm da base para o topo, tendo-se obtido valores médios de 14,6 e 13,8 mm, respetivamente (Figura 5.8). Os resultados de Santos et al. (2019), que apresentam diâmetros de concavidade maior em rebocos à base de terra, entre 18 e 21 mm, revelam uma resistência mecânica menor que a obtida neste caso de estudo. Dada a irregularidade das superfícies de taipa na muralha original, não se conseguiu efetuar aí este ensaio.

Qualitativamente, os ensaios de esclerómetro pendular e de choque de esfera revelaram, ambos, resultados que justificam a elevada resistência superficial do material que constitui a muralha.

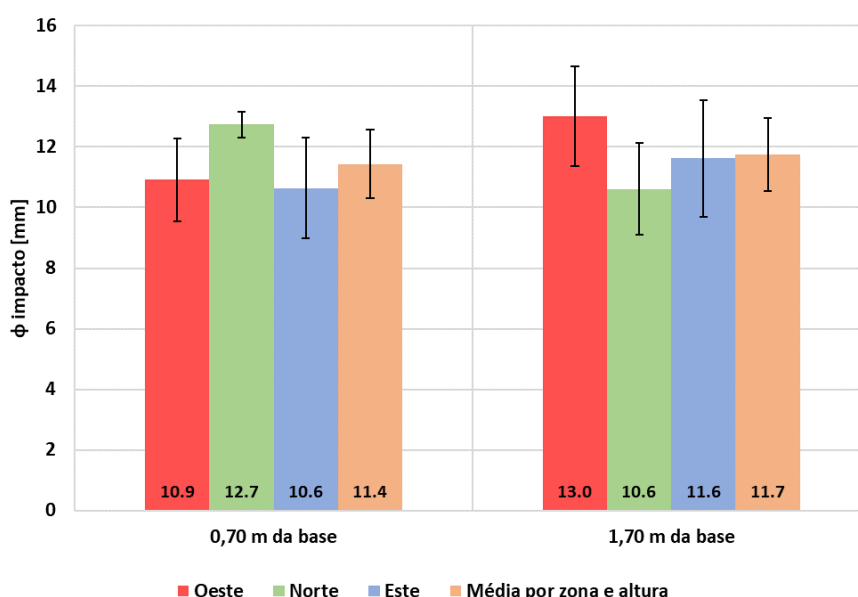


Figura 5.7 - Valores da resistência superficial por choque de esfera obtidos nas paredes interiores da Torre do Jogo da Péla (caso de estudo 1)

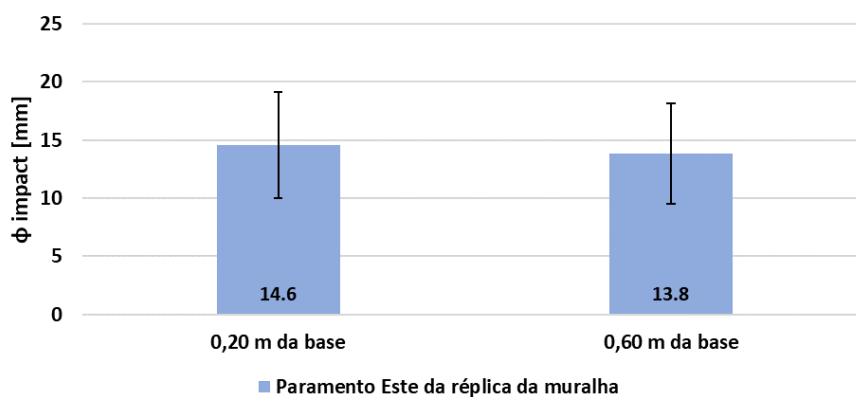


Figura 5.8 - Valores da resistência superficial por choque de esfera obtidos na réplica da muralha em taipa no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7)

5.3.3 Velocidade de propagação de ultrassons por método indireto

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons apenas foi possível realizar num caso de estudo visitado, dada a falta de regularidade e coesão das superfícies analisadas (e também devido a avaria de um dos equipamentos utilizados). No caso de estudo 7 (Terraços de Bragança) foi realizada uma avaliação comparativa entre a parede exposta a Sul da muralha original e a de uma parede da réplica da muralha. Verificou-se pela Figura 5.9, como expectável, que o valor médio da velocidade de ultrassons é maior na réplica da muralha dada a sua melhor conservação em relação à parede original que se encontrava mais degradada. De referir que a menor heterogeneidade e maior compacidade (menos vazios) e coesão superficial da réplica da muralha também constituem fatores que influenciam o valor superior de velocidade obtido.

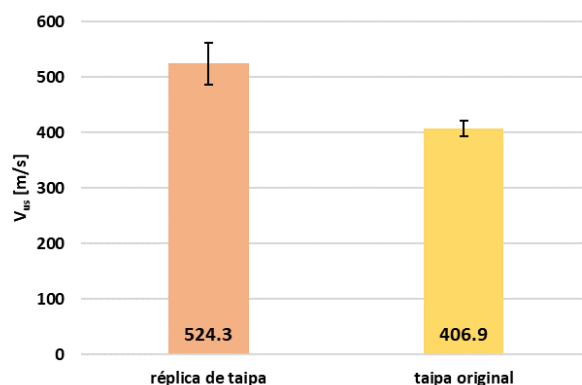


Figura 5.9 - Valores de velocidade de propagação de ultrassons obtidos na taipa original e réplica da muralha no Condomínio dos Terraços de Bragança (caso de estudo 7)

Comparativamente aos valores encontrados por Oliveira (2017) e Cotrim Coradinho (2018) para as amostras de adobe e taipa, respetivamente, é possível verificar que os valores são bastante mais elevados quando comparados aos deste caso de estudo. Quando se compara com as taipas analisadas por Ferreira (2017), na avaliação da construção em taipa corrente da zona de Leiria, os valores neste troço analisado apresentam menores valores de velocidade de ultrassons. Os valores de outros

trabalhos comparados nesta secção encontram-se na Tabela 5.1. No entanto, alguns desses ensaios foram realizados em laboratório, em amostras recolhidas, e não *in situ*, pelo que há que ter em conta a influência das condições climáticas.

Tabela 5.1 – Síntese de valores da velocidade de propagação de ultrassons obtidos por outros autores em amostras de taipa e adobe

Referência (autor)	Material analisado		Velocidade de propagação de ultrassons [m/s]	
	Tipo	Amostras	Média	Desvio padrão
Oliveira (2017)	Adobe (Pinhal Novo), em laboratório	Caso 218	807,7	235,0
		Caso 267	719,8	181,3
		Caso 17015	647,1	274,5
Ferreira (2017)	Taipa (Leiria), em laboratório	T1	874,6	147,1
		T2	609,5	70,1
		T3	475,2	131,7
	Adobe (Leiria), em laboratório	A1	921,1	262,7
		A2	339,4	46,2
		A3	272,5	36,5
Cotrim Coradinho (2018)	Taipa (Paderne), <i>in situ</i>	Torre 2018	1405,0	363,9
		Torre original	1111,4	133,6
		Muralha 2004	953,3	163,3
		Terra projetada 2004	641,4	391,5
		Muralha original	1438,7	644,9

Face aos resultados do ensaio através do choque de esfera, no paramento analisado verificaram-se valores baixos de diâmetro causado pelo impacto da esfera, revelando resistência superficial elevada, o que vai também de acordo com o elevado valor da velocidade de propagação de ultrassons. Este elevado valor poderá indicar que o material da réplica poderá possuir uma maior homogeneidade e, possivelmente, menor número de fendas ou vazios no seu interior. Embora tenham sido poucos resultados, dada a técnica de construção ser feita com uma compactação morosa, estes resultados não são de todo surpreendentes.

5.3.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de *Karsten*

Através do ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de *Karsten* foi possível traçar o gráfico da quantidade de água absorvida em função do tempo. A realização deste ensaio foi possível nos casos de estudo 1, 3 e 7, tal como descrito em 5.3.1.

No caso de estudo 1 - Torre do Jogo da Péla - o ensaio foi efetuado no interior da torre nos paramentos orientados a Norte e a Este, tendo-se registado absorção nula após os 30 minutos que se

estabeleceram para a execução do ensaio. Esta situação mostra que o reboco, aparentemente de cal, existente nas paredes do núcleo interior da torre bloqueou a entrada de água. No entanto, não foi possível aceder a quaisquer dados referentes às características da argamassa empregue ou eventuais tratamentos superficiais que justifiquem o comportamento ocorrido.

Para o caso de estudo 3 – Palácio da Independência - foram analisadas várias zonas da parede da muralha muito irregular e exposta. Foram colocados tubos em 4 materiais constituintes da alvenaria de pedra argamassada distintos: em pedra, argamassa cinzenta, argamassa rosada e tijolo de encasque, cujos resultados estão presentes nas Figura 5.10 e Figura 5.11.

De salientar que, do conjunto de tubos colocados sobre a argamassa de tom mais acinzentado, o tubo 4 apresentou uma maior taxa de absorção de água, absorvendo quase os 4 ml de água durante os 30 minutos estabelecidos, o que demonstra que o material nesta zona será mais permeável e com menor presença, eventualmente, de cerâmica, facilitando a entrada de água.

A argamassa rosa e o tijolo de encasque apresentaram a mesma tendência de absorção lenta revelando que, no geral, a zona da muralha preenchida com esses materiais apresenta um comportamento semelhante face à absorção de água. Um facto interessante observado foi que, tanto na argamassa rosada como no tijolo de encasque, um tubo não evidenciou qualquer absorção de água, e no tijolo de encasque se verifica uma grande heterogeneidade na absorção de água com um tubo a registar uma absorção quase nula no tempo de ensaio (20 min).

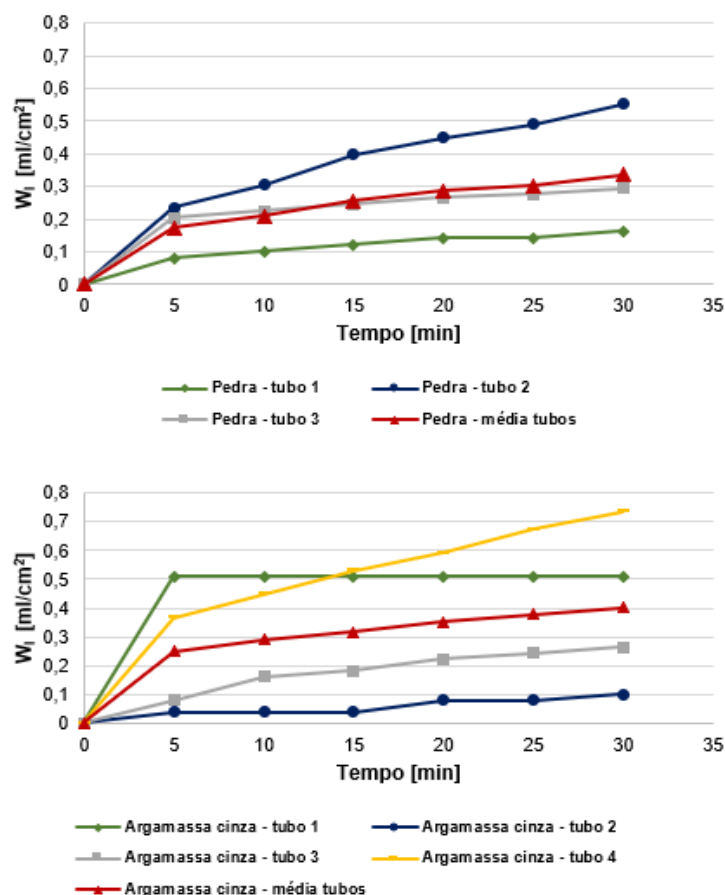


Figura 5.10 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na pedra e argamassa de cor cinzenta da alvenaria de pedra argamassada do caso de estudo 3 – Palácio da Independência

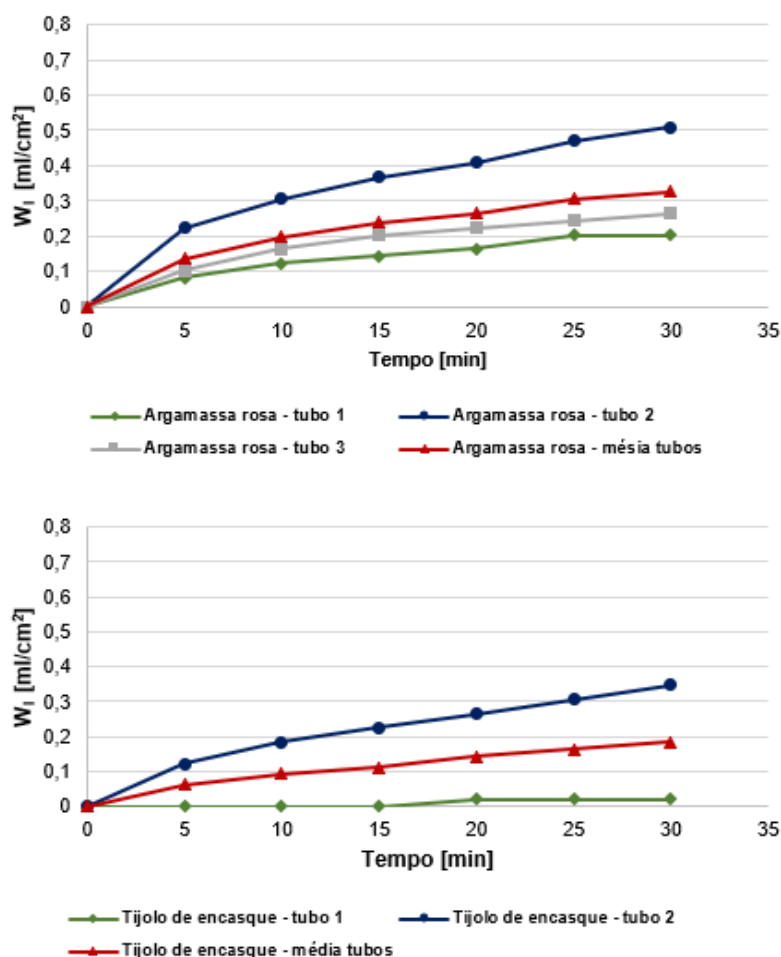


Figura 5.11 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na argamassa rosada e tijolo de encasque da alvenaria de pedra argamassada do caso de estudo 3 – Palácio da Independência

Por último, no caso de estudo 7 – Condomínio Terraços de Bragança - os tubos, em número de 3 por local, foram colocados na parede Sul de taipa original da muralha e na parede Norte da réplica de muralha. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 5.12.

Os resultados de absorção de água para a taipa original como para a sua réplica (Figura 5.12) mostram uma absorção lenta de água em função do tempo e, em cada local, apenas um tubo se destaca com uma absorção mais rápida. Embora não se tenha detetado a presença de fissuras nas áreas de ensaio, não se exclui que existisse microfissuração que justifique o comportamento do tubo que evidenciou maior absorção. Os outros dois tubos colocados na réplica da muralha mostraram uma absorção mais rápida comparativamente aos na muralha original. No entanto, esta rapidez pode ser justificada pela possibilidade de a cal utilizada na construção da réplica interromper as ligações entre lamelas de argila e, por consequência, a entrada de água ser mais facilitada. Na parede de taipa original a menor absorção de água pode estar relacionada com o facto dela se encontrar parcialmente saturada devido ao ambiente húmido em que se situa, isto é, debaixo de um edifício de piso vazado e sem incidência de radiação solar direta, e também devido à ascensão capilar e à membrana de impermeabilização que se encontra na sua retaguarda (colocada pela obra em edifício adjacente, que foi referida oralmente mas que não foi possível observar). Os tubos 2 e 3 da taipa original revelaram que a absorção de água apenas começou depois dos 6/7 minutos, analogamente com os tubos 2 e 3 da réplica.

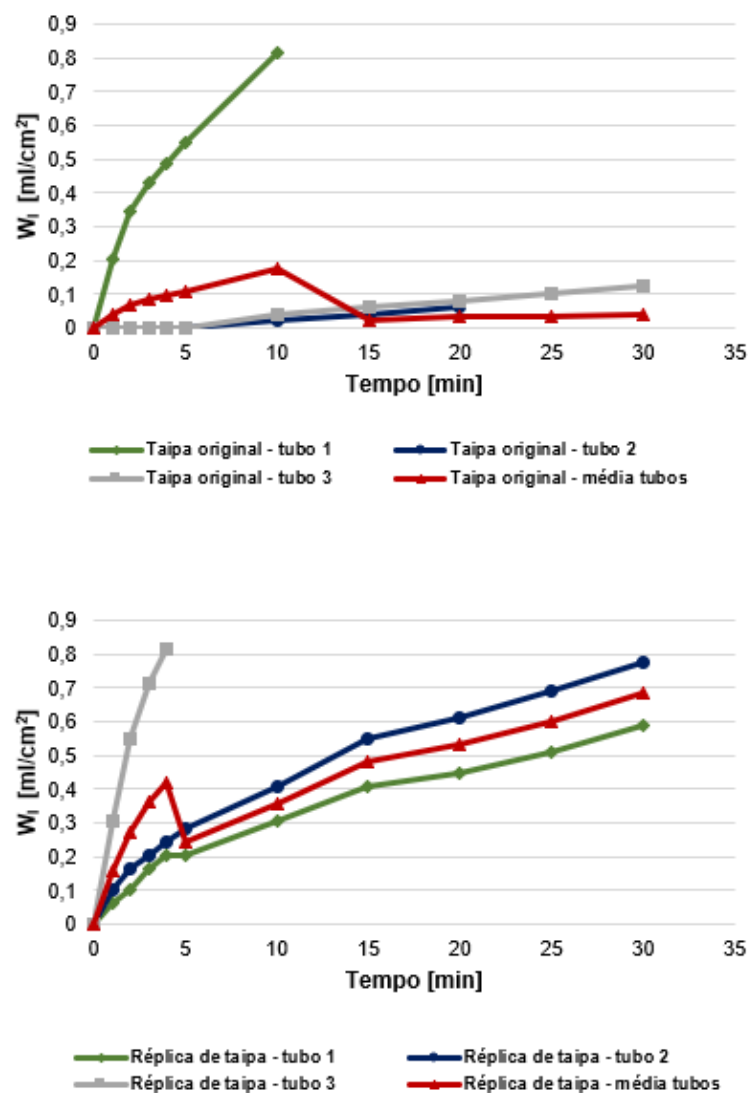


Figura 5.12 - Curvas de absorção de água sob baixa pressão obtidas na parede de taipa original e réplica no caso de estudo 7 – Condomínio Terraços de Bragança

5.4 Resultados da caracterização química e mineralógica

Para a análise dos ensaios de DRX e ATG/dTG/ATD, à semelhança dos resultados dos ensaios anteriores de absorção de água por capilaridade e secagem, os diferentes gráficos destes ensaios estão inseridos nas fichas de cada caso de estudo no Anexo A3.

5.4.1 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

Os resultados da análise efetuada aos 18 provetes de argamassa de cal e de taipa foram divididos em três tabelas – duas para provetes de argamassa de pedra irregular argamassada e uma para os provetes de taipa – Tabela 5.2 à Tabela 5.3.

Tabela 5.2 - Composição mineralógica qualitativa dos provetes de argamassa de alvenaria de pedra calcária irregular

Compostos cristalinos identificados	JP_T1.2		JP_T1.3		JP_T3.3		JP_T4		PR_M3.1		PR_M6.1	
	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF
Quartzo (SiO ₂)	++/+++	+ /++	++/+++	+ /++	++/+++	+ /++	+++	++	+++	+ /++	+++	+ /++
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈ - CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	Vtg	Vtg	Vtg	+	Vtg/+	+	+ /++	?	++	+	++	+
Mica (moscovite KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ /biotite K(Mg,Fe ²⁺) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	?	-	Vtg	Vtg/+	Vtg	Vtg	+	-	+	?	+	?
Calcite (CaCO ₃)	+++	+++	+++	+++	++	+++	++	+++	++/+++	+++	++/+++	+++
Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	-	-	Vtg	-	Vtg	-	Vtg	-	-	-	-	-
Gesso (CaSO ₄ .2(H ₂ O))	-	-	-	-	-	-	-	-	Vtg/+	Vtg/+	-	Vtg
Aluminato de cálcio hidratado (Ca ₂ Al(OH) ₇ .6.5H ₂ O)	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Etringite (Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ .26H ₂ O)	-	-	-	-	?	+	-	-	-	-	-	-
Tobermorite ((CaO) _x .SiO ₂ .7H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vtg

Notação: FG – fração global; FF – fração fina; ++++ - composto predominante; +++ - composto em proporção elevada; ++ - composto em proporção média; + - composto em proporção fraca; Vtg – vestígios; ? - dúvidas na presença

Tabela 5.2 - Composição mineralógica qualitativa dos provetes de argamassa de alvenaria de pedra calcária irregular (continuação)

Compostos cristalinos identificados	CSH_T2.1		RTT_T.1		RTT_M.1		RTT_P.1		CS_C		TB_T1.1		PI_M	
	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF
Quartzo (SiO ₂)	+++	+ /++	++/+++	+	+++	++	+++	+ /++	++/+++	+ /++	++	+ /++	+++	+ /++
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈ - CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	Vtg	?	++	Vtg	Vtg	+	+ /++	+	+ /++	Vtg	Vtg/+	Vtg	+	Vtg
Mica (moscovite KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ /biotite K(Mg,Fe ²⁺) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	Vtg	?	+	Vtg	Vtg	Vtg	Vtg	Vtg	+	-	Vtg/+	-	Vtg/+	Vtg
Talco (Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)	-	Vtg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Caunite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	-	-	Vtg				-	-	-	-	?	?	-	-
Calcite (CaCO ₃)	++/+++	+++	++/+++	+++	++/+++	+++	++/+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Gesso (CaSO ₄ .2(H ₂ O))	-	-	?	-	-	Vtg	-	-	-	?	-	-	-	?
Aluminato de cálcio hidratado (Ca ₂ Al(OH) ₇ .6.5H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vtg/+	Vtg/+	-	-
Etringite (Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ .26H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vtg	+	-	-
Weddelite (C ₂ CaO ₄ .2H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	

Notação: FG – fração global; FF – fração fina; ++++ - composto predominante; +++ - composto em proporção elevada; ++ - composto em proporção média; + - composto em proporção fraca; Vtg – vestígios; ? - dúvidas na presença

Tabela 5.3 - Composição mineralógica qualitativa dos provetes de taipa

Compostos cristalinos identificados	EGV_M1.2		EGV_M2.2		LG_M		TB_M1.3		TB_M2.4	
	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF	FG	FF
Quartzo (SiO ₂)	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	++	+++	++
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈)	++	+/++	+	+	+/++	Vtg	+/++	+	++	+/++
Mica (moscovite KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ /biotite K(Mg,Fe ²⁺) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	+	+	+	+	+/++	+/++	+	+	+/++	+
Caulinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	-	-	-	-	-	-	Vtg	Vtg	Vtg	Vtg
Calcite (CaCO ₃)	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	Vtg	Vtg	?	-	-	-	-	-	-	-
Silicatos e aluminatos de cálcio anidros (3CaO.SiO ₂ , 2CaO.SiO ₂)	-	-	-	-	-	Vtg	-	-	-	-

Notação: FG – fração global; FF – fração fina; ++++ - composto predominante; +++ - composto em proporção elevada; ++ - composto em proporção média; + - composto em proporção fraca; Vtg – vestígios; ? - dúvidas na presença

Face aos resultados obtidos para a composição mineralógica das amostras de argamassa (Tabela 5.2) pode concluir-se que os minerais identificados em maior proporção foram o quartzo, os feldspatos e a mica, facto que indicia a utilização de areias siliciosas. A proporção quartzo/feldspatos é muito variável entre casos de estudo, o que indicia o uso de areias de diferentes origens.

Em termos da pasta do ligante o principal composto detetado foi a calcite, o que indicia ter sido usada cal aérea cálcica. No entanto, em alguns provetes (por exemplo JP_T3.3, PR_M6.1 e TB_T1.1) detetou-se a presença de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, o que indicia a presença dum ligante hidráulico.

De referir a presença de vestígios de gesso nas amostras PR_M3.1, PR_M6.1 e RTT_M.1, o que traduz a presença de sais solúveis (sulfatos), e ainda de weddellite na amostra TB_T1.1, o que traduz a contaminação por colonizações biológicas (que era também visível na superfície do troço).

Nas amostras de taipa (Tabela 5.3) pode concluir-se que os minerais identificados em maior proporção foram o quartzo, os feldspatos, a mica e a calcite, facto que indicia a utilização de agregados siliciosos e calcários. Em termos dos compostos do ligante, há a referir a presença de calcite, mica e caulinite, o que é característico de amostras de taipa militar. No entanto, em termos de minerais de argila (mica e caulinite) a sua proporção é muito variável entre os vários casos de estudo, o que mais uma vez revela a utilização de diferentes materiais nas várias zonas analisadas da muralha.

De referir na amostra LG_M (caso de estudo 9) a presença de silicatos de cálcio anidros, usuais em argamassas de cimento, o que parece indicar uma zona em que terá havido anteriormente trabalhos de conservação/reparação.

Nas amostras de taipa não se detetaram sais solúveis ou outros compostos que se possam atribuir a processos de degradação química.

5.4.2 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)

Da análise das curvas ATG/dTG/ATD dos provetes de argamassa com pedra irregular calcária consideraram-se três gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa (Tabela 5.4) que, acordo com a composição mineralógica, são atribuíveis a:

- 25 a 200/300 °C – zona de perda devida à desidratação de água livre, de hidratação e zeolítica;
- 200/300 a 550 °C – zona de perda devida essencialmente à desidroxilação dos minerais de argila e silicatos de cálcio hidratados;
- 550 a 900 °C – zona de perda devida à descarbonatação dos carbonatos.

Verifica-se que as curvas ATG/dTG/ATD apresentam um comportamento consentâneo com as composições mineralógicas anteriormente obtidas, com as principais perdas de massa atribuíveis à desidratação dos aluminatos de cálcio hidratados (provetes JP_T3.3, JP_T1.2.1 e JP_T1.3, todos da Torre da Péla – caso de estudo 1) e à descarbonatação do carbonato de cálcio.

As curvas ATD mostram um comportamento semelhante e consentâneo com o das curvas dTG, como é habitual para este tipo de materiais, havendo apenas a presença de um pico endotérmico, a cerca de 580 °C, que corresponde à transição $\alpha \rightarrow \beta$ do quartzo.

Em termos globais, a argamassa do provete RTT_T.1 é aquela que mostra a maior perda ao rubro, facto essencialmente relacionado com a maior perda de massa devida à descarbonatação dos carbonatos (500 – 900 °C).

Tabela 5.4 - Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes de argamassa de pedra irregular calcária

Caso de estudo	Identificação do provete	Gamas de Temperatura (°C)			Perda ao Rubro*
		25 - 200	200 - 500	500 - 900	
Torre Jogo da Péla	JP_T1.2	1,36	1,28	25,23	27,96
	JP_T1.3	1,09	1,09	24,50	26,79
	JP_T3.3	5,29	2,13	20,31	27,90
	JP_T4	0,72	1,23	20,51	22,50
Palácio da Rosa	PR_M3.1	0,61	1,29	16,28	18,47
	PR_M6.1	4,33	4,20	6,95	16,59
Corpo Santo Hotel	CSH_T2.1	1,98	0,94	21,13	24,08
Rua Terreiro do trigo	RTT_T.1	2,40	2,44	26,32	31,38
	RTT_M.1	1,34	1,60	22,26	25,17
	RTT_P.1	0,45	0,78	21,04	22,32
Calçada de Santana	CS_C	2,35	1,91	18,85	23,15
Terraços de Bragança	TB_T1.1	5,87 (25-300)	1,63 (300-500)	17,18	24,87
Palácio da Independência	PI_M	1,16	1,53	24,05	26,91

Notação: * Valor da perda de massa entre 25 e 1000 °C

Na análise das curvas ATG/dTG/ATD dos provetes de taipa consideraram-se as mesmas 3 gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa (Tabela 5.5), e correspondentes aos mesmos intervalos

de temperatura dos provetes de argamassa. Confirma-se que as principais perdas de massa são devidas à presença de compostos hidratados e carbonatados. Verifica-se ainda que os provetes de taipa apresentam perdas de massa muito distintas entre as amostras dos vários casos de estudo considerados, o que confirma os resultados da DRX que os materiais empregues nesses locais são também diferentes.

Tabela 5.5 - Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes de taipa

Caso de Estudo	Identificação do provete	Gamas de Temperatura (°C)			Perda ao Rubro*
		25 - 200	200 - 500	500 - 900	
Escola Gil Vicente	EGV_M1.2	3,71	3,27	20,32	27,68
	EGV_M2.1	7,27	4,91	18,46	29,64
Larga do Graça	LG_M	0,69	0,54	9,17	10,38
Terraços de Bragança	TB_M1.2	8,21	2,12	7,22	17,84
	TB_M2.4	3,09	2,18	7,03	12,74

Nota: * Valor da perda de massa entre 25 e 1000 °C

5.4.3 Determinação do resíduo insolúvel em ácido

Os valores obtidos do resíduo insolúvel em ácido para os diferentes provetes estão indicados nas Tabelas 5.6 e 5.7. Nestas tabelas inclui-se ainda o teor de agregado total que corresponde à soma do teor de RI com a do agregado calcário separado durante a observação macroscópica.

Tabela 5.6 – Teor de resíduo insolúvel em ácido e de agregado total nos provetes de argamassa de pedra irregular calcária

Caso de Estudo	Amostra	Provete	RI [%]	Teor de agregado total na amostra [%] [§]
Torre Jogo da Péla	JP_T1	JP_T1.2	46.7	54.2
		JP_T1.3	30.5	56.8
	JP_T3	JP_T3.3	73.6	74.7
	JP_T4	JP_T4	56.3	57.7
Calçada de Santana	CS_C	CS_C	49.6	59.0
Palácio da Independência	PI_M	PI_M	37.9	77.2
Palácio da Rosa	PR_M3	PR_M3.1	46.8	56.3
	PR_M6	PR_M6.1	79.0	82.0
Corpo Santo Hotel	CSH_T2	CSH_T2.1	63.3	68.6
Terraços de Bragança	TB_T1	TB_T1.1	42.7	65.5
Rua Terreiro do Trigo	RTT_P	RTT_P.1	65.7	79.3
	RTT_T	RTT_T.1	35.1	45.5
	RTT_M	RTT_M.1	44.2	52.6

§ - Inclui o valor de agregado calcário separado manualmente durante a observação macroscópica dos provetes.

Tabela 5.7 – Teor de resíduo insolúvel em ácido e de agregado total nos provetes de taipa

Caso de Estudo	Amostra	Provete	RI [%]	Teor de agregado total na amostra [%] ^(*)
Escola Gil Vicente	EGV_M1	EGV_M1.2	54.7	59.0
	EGV_M2	EGV_M2.1	42.9	61.5
Terraços de Bragança	TB_M1	TB_M1.2	59.2	65.6
	TB_M2	TB_M2.4	77.8	81.8
Largo da Graça	LG_M	LG_M	56.7	74.7

(*) - Inclui o valor de agregado calcário separado manualmente durante a observação macroscópica dos provetes.

Nos provetes de argamassa os valores de RI (areia siliciosa) estão compreendidos entre 30 e 79 %, enquanto nos de taipa os valores são entre 43 e 78 %. Em termos de agregado global (areia siliciosa + calcário) os valores são entre 46 e 82 % para as argamassas e entre 62 e 82 % para a taipa. Em termos relativos os provetes de taipa são mais ricos em agregado que os de argamassa.

5.4.4 Análise granulométrica do agregado nas argamassas e taipas

A análise granulométrica do agregado presente nos provetes de argamassa e de taipa foi efetuada após o ataque ácido (dados da Tabela 5.6 e Tabela 5.7). Os valores registados, em %, do material retido e do material que passa em cada peneiro estão presentes no Anexo A4 para cada um dos 18 provetes selecionados. Nas Figuras 5.13 e 5.14 estão representadas, para ambos os tipos de provetes, as curvas granulométricas obtidas.

Pela análise das curvas granulométricas da Figura 5.13 é possível verificar que o provete PR_M6.1 é o que apresenta a maior percentagem de agregado grosso (> 4,75 mm). O provete JP_T4 apresenta um comportamento um pouco distinto das restantes, pois é aquele que, em termos de dimensão do agregado, apresenta a maior percentagem de material constituinte entre os 150 µm e 1,18 mm. Com maior percentagem de material fino encontram-se os provetes JP_T1.3 e PI_M. Nos restantes provetes a distribuição granulométrica dos grãos de agregado é muito semelhante, não ocorrendo uma grande disparidade de valores.

Nos provetes de taipa estabilizada (terra e cal) o provete TB_M2.4 é o que possui a maior percentagem de agregado grosso (Figura 5.14). Os provetes EGV_M1.2 e EGV_M2.2, embora sendo extraídos do mesmo local, apresentam curvas distintas a partir da dimensão de 300 µm, embora semelhantes na dimensão de material mais grosseiro. Este facto, prova que as taipas do caso da Escola Gil Vicente são distintas em termos de estratigrafia e composição material. O provete LG_M é o que apresenta menores percentagens de material fino (< 150 µm) e grosso (> 4,75 mm).

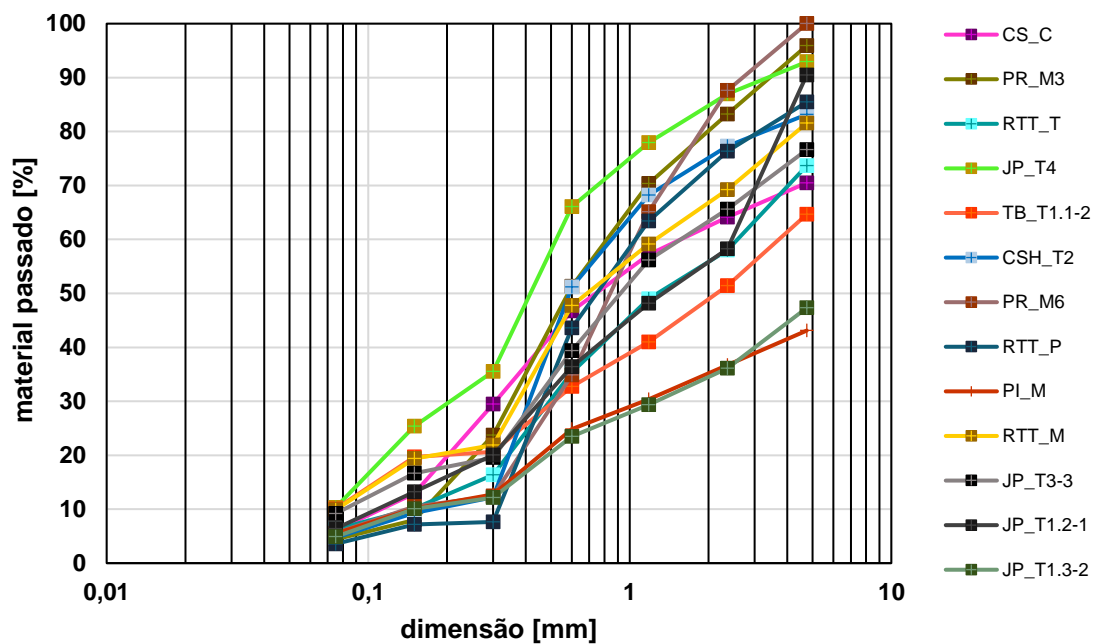


Figura 5.13 – Curvas granulométricas do agregado nos provetes de pedra irregular argamassada

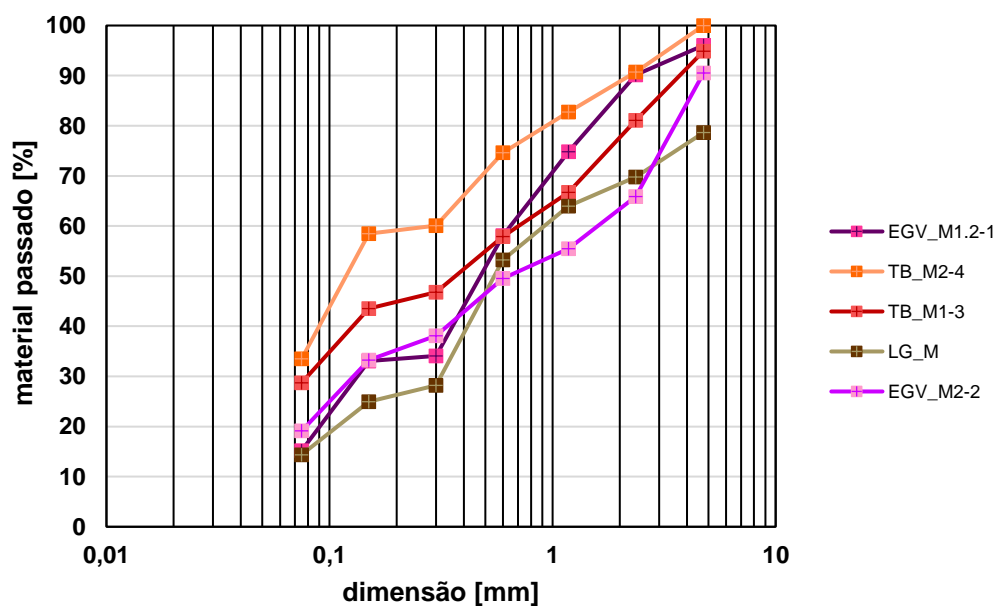


Figura 5.14 – Curvas granulométricas do agregado nos provetes de taipa

5.4.5 Determinação do traço das amostras argamassa e de taipa

Para os provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular calcária determinou-se o teor de cal hidratada com base na reação de carbonatação do hidróxido de cálcio presente na equação 5.1 e de acordo com a equação 5.2.

$$\text{Teor de Ca(OH)}_2 = \text{CO}_2 \times \frac{\text{MM}_{\text{Ca(OH)}_2}}{\text{MM}_{\text{CaCO}_3}} \quad \text{Equação 5.2}$$

Com base nos valores apresentados na Tabela 5.6 e 5.7 e pela aplicação da equação 5.2 determinou-se o traço ponderal das argamassas, que se apresenta nas Tabelas 5.8 e 5.9.

Pela análise granulométrica apresentada em Parracha et. al (2019), verificam-se nos provetes de taipa valores baixos tais como os de taipa da muralha Fernandina, excetuando-se o caso do provete LG_M, o que era de esperar devido à elevada percentagem de agregados calcários.

Tabela 5.8 - Composição e traço dos provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular calcária (% em massa)

Identificação do provete	Valores em %			Traço ponderal
	Areia siliciosa (1)	Agregado calcário (2)	Cal hidratada (3)	(cal aérea + agregado calcário : areia)
JP_T1.2	47	7	36	1 : 0,2 : 1,3
JP_T1.3	30	26	22	1 : 1,2 : 1,4
JP_T3.2	74	1	33	1 : 0,03 : 2,2
JP_T4	56	1	34	1 : 0,03 : 1,6
PR_M3.1	47	9	20	1 : 0,5 : 2,4
PR_M6.1	79	3	10	1 : 0,3 : 7,9
CSH_T2.1	63	5	32	1 : 0,2 : 2,0
RTT_T.1	35	10	37	1 : 0,3 : 0,9
RTT_M.1	44	8	32	1 : 0,3 : 1,4
RTT_P.1	66	13	25	1 : 0,5 : 2,6
CS_C	50	6	25	1 : 0,2 : 2,0
TB_T1.1	43	22	12	1 : 1,8 : 3,6
PI_M	38	39	12	1 : 3,3 : 3,2

Notação: (1) Teor de resíduo insolúvel; (2) teor obtido durante a desagregação das amostras; (3) Teor obtido a partir dos resultados da Tabela 5.6

Tabela 5.9 - Composição e traço dos provetes de taipa (% em massa)

Identificação do provete	Valores em %				Traço ponderal
	Areia siliciosa (1)	Agregado calcário (2)	Terra (areia+silte) (3)	Cal hidratada (4)	(cal aérea + agregado calcário : terra : areia)
EGV_M1.2	55	4	8	31	1 : 0,1 : 0,3 : 1,8
EGV_M2.2	43	19	8	13	1 : 1,5 : 0,6 : 3,3
LG_M	57	18	8	2	1 : 9,0 : 4,0 : 28,5
TB_M1.3	59	7	17	7	1 : 1,0 : 2,4 : 8,4
TB_M2.4	78	3	26	9	1 : 0,3 : 2,9 : 8,7

Notação: (1) Teor de resíduo insolúvel; (2) teor obtido durante a desagregação das amostras; (3) Teor obtido durante a separação do RI e correspondente à fração < 0,075 mm; (4) Teor obtido a partir dos resultados da Tabela 5.7

5.5 Resultados da caracterização físico-mecânica

5.5.1 Condutibilidade térmica

Na Figura 5.15 estão presentes os resultados de condutibilidade térmica para os diferentes provetes provenientes das carotes dos casos de estudo 1, 4, 6 e 7. Através deste parâmetro pode também aferir-se a compacidade entre amostras. Os resultados de condutibilidade térmica só podem ser considerados reais em materiais considerados homogêneos. No entanto, para além do parâmetro em si, em cada área os resultados do ensaio dão indicação, de forma indireta, da compacidade e homogeneidade do material analisado.

Observando a Figura 5.15 o provete com os valores mais elevados de condutibilidade térmica é o JP_T1.3 do caso de estudo 1 (Jogo da Péla), seguido do TB_T1.1 do caso de estudo 7 (Terraços de Bragança). Os valores mais baixos registam-se nos provetes EGV_M1.1 e EGV_M2.1 do caso de estudo 4 (Escola Gil Vicente), TB_M2.1 do caso de estudo 7 (Terraços de Bragança) e JP_T3.2 (Jogo da Péla). Na torre do Jogo da Péla (caso de estudo 1) é notória a diferença de valores entre o provete da carote horizontal (JP_T1.3) e os das carotes verticais (JP_T2.1 e JP_T3.1). Os valores mais baixos registam-se na taipa do caso de estudo 2 (Escola Básica e Secundária Gil Vicente), o que era previsível dada a falta de coesão superficial aí observada, o que origina espaços vazios e, por consequência, uma baixa condutibilidade térmica.

No caso dos provetes de taipa do caso de estudo 7 (Terraços de Bragança), constata-se que, em termos médios, apresentam valores superiores aos da taipa do caso de estudo 2, o que seria de esperar pois a taipa difere no tipo de terra usada (mais clara) e apresenta aspeto mais compactado, aumentando a compacidade do material e por sua vez a condutibilidade térmica. Para o caso de estudo 6 (Corpo Santo Hotel) o único provete ensaiado revelou um valor médio de condutibilidade térmica, e semelhante aos de alvenaria de pedra argamassada do caso de estudo 1, embora com diferentes ligantes e agregados. Os elevados desvios-padrão registados podem resultar da heterogeneidade de alguns materiais, nomeadamente da existência local de pedra face à matriz de ligante.

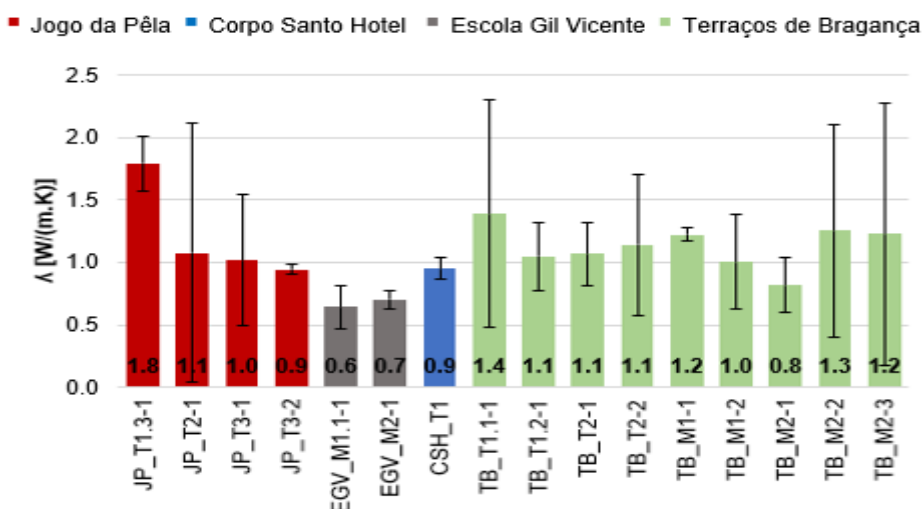


Figura 5.15 – Valores da condutibilidade térmica para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular

5.5.2 Dureza superficial através do durómetro

Para a avaliação da resistência superficial por durómetro procedeu-se à avaliação em ambas as faces de cada um dos 16 provetes. Dada a diversidade de materiais empregues em cada provete, desde vários tipos de agregados e nódulos de cal, e a irregularidade da superfície, foi necessário efetuar cerca de 5/6 medições para se ter uma avaliação mais coerente e abrangente da dureza superficial. Na Figura 5.16 apresentam-se os valores médios de dureza superficial obtidos.

Como se constata da Figura 5.16, não se obtiveram grandes diferenças entre os vários casos de estudo e materiais, fixando-se os valores médios entre os 79 – 97 Shore A. O limite da escala do durómetro é de 100 pelo que valores muito perto desse limite apresentam pouca fiabilidade. Analisando em mais detalhe esses valores, identificam-se os provetes TB_T1.2 e TB_M1.1, ambos do caso de estudo 7 (Terraços de Bragança), como os que apresentam maior valor de dureza e, no sentido oposto, os provetes EGV_M1.1 e EGV_M2.1 do caso de estudo 4 (Escola Básica e Secundária Gil Vicente).

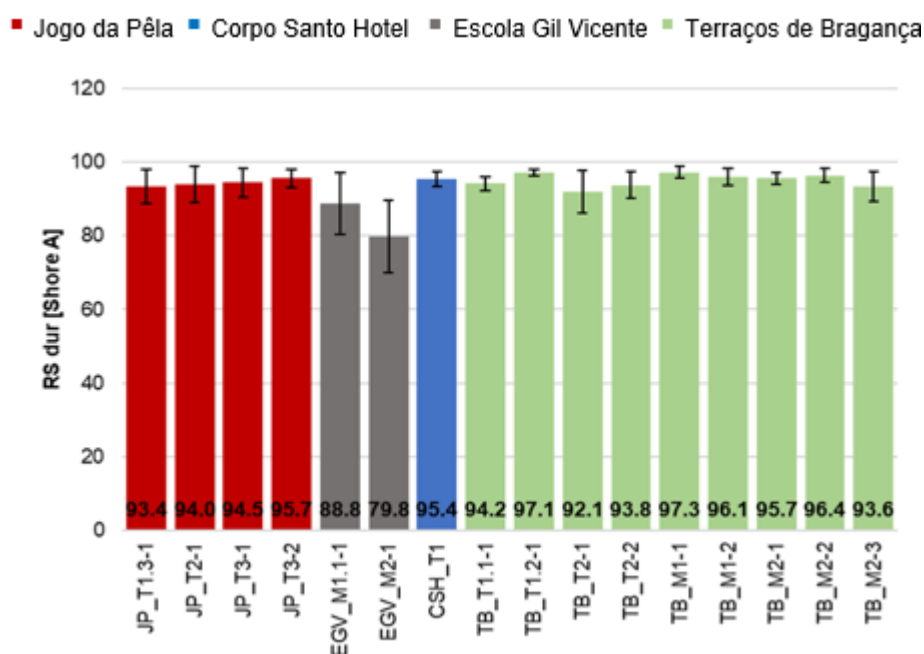


Figura 5.16 – Valores médios da dureza superficial para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular

Comparando com os valores obtidos por Ferreira (2017) para amostras de taipa da região de Leiria, é possível observar que esses são bastante inferiores (45 – 55 unidades Shore A) aos apresentados nesta dissertação. Comparativamente com a taipa analisada por Cotrim Coradinho (2018), os resultados de dureza superficial desse estudo (56 – 69 unidades Shore A) tal como os de Ferreira (2017), também são menores o que revela tratar-se de um material menos resistente superficialmente.

Segundo a classificação tabelada na norma ASTM (2010) atribui - para os valores acima de 90 Shore A - a designação de material moderadamente duro apenas no caso dos materiais com este tipo de alvenaria (argamassada).

5.5.3 Massa volúmica aparente

O valor da massa volúmica aparente dos 16 provetes (Figura 5.17), determinados pelo método geométrico, não apresentam grandes diferenças entre si. O provete JP_T2.1 é o que apresenta o valor mais elevado e o JP_T1.3 o menor, ambos do mesmo material e caso de estudo 1 (Torre Jogo da Péla). Os provetes de taipa apresentam valores de ordem de grandeza muito semelhante aos de alvenaria de argamassa de pedra irregular, o que não era à partida esperado. Nos provetes de argamassa os valores obtidos são de acordo com o expectável, uma vez que apresentam agregados calcários de grandes dimensões, o que pode justificar os elevados resultados.

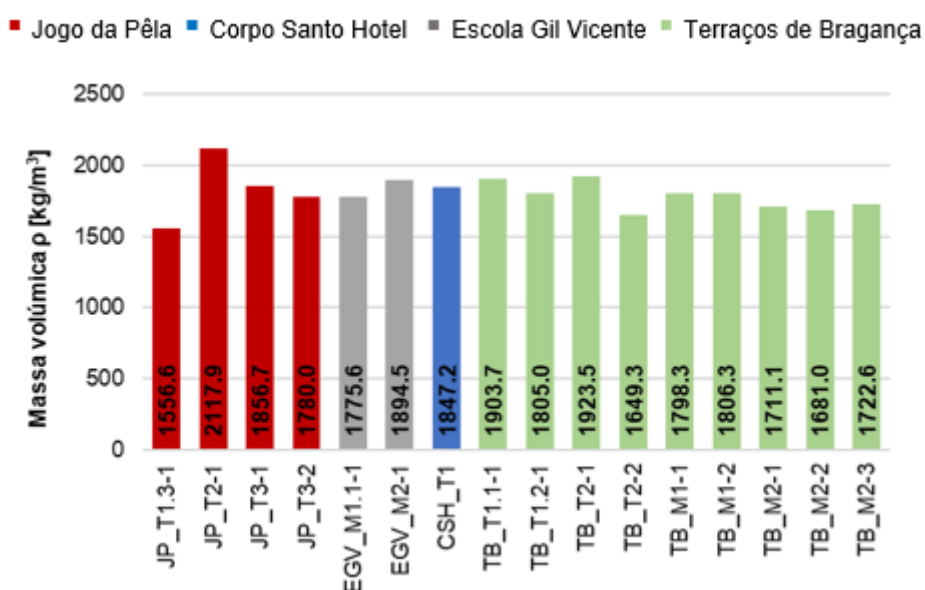


Figura 5.17 – Valores de massa volúmica aparente para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular

Na Tabela 5.10 apresentam-se os valores obtidos para cada provete e os valores da média e desvio padrão para cada caso de estudo.

5.5.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 5.18) quantificam a capacidade que o material ensaiado, neste caso a taipa e a argamassa da alvenaria de pedra irregular, tem para absorver determinadas deformações. Nos casos em que se verifica um módulo de elasticidade elevado resultará uma menor capacidade de deformação do material, e quanto menor, maior será a possibilidade de deformação. Em amostras de taipa, como é o caso dos provetes EGV_M1.1, EGV_M2.1, TB_M1.1, TB_M1.2, TB_M2.1, TB_M2.2 e TB_M2.3, este ensaio não é tão conclusivo dada a elevada heterogeneidade de materiais presentes, fraca coesão e grande porosidade.

Tabela 5.10 – Valores individuais da massa volúmica aparente, e média e desvio padrão entre provetes do mesmo caso de estudo

Amostra	Provete	Massa volúmica [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]
JP_T1	JP_T1.3	1556,6	1827,8	231,5
JP_T2	JP_T2.1	2117,9		
JP_T3	JP_T3.1	1856,7		
	JP_T3.2	1780,0		
EGV_M1	EGV_M1.1	1775,6	1835,1	84,1
EGV_M2	EGV_M2.1	1894,5		
CHS_T1	CSH_T1.1	1847,2	1847,2	-
TB_T1	TB_T1.1	1903,7	1820,4	125,3
	TB_T1.2	1805,0		
TB_T2	TB_T2.1	1923,5	1820,4	125,3
	TB_T2.2	1649,3		
TB_M1	TB_M1.1	1798,3	1743,9	55,5
	TB_M1.2	1806,3		
TB_M2	TB_M2.1	1711,1		
	TB_M2.2	1681,0		
	TB_M2.3	1722,6		

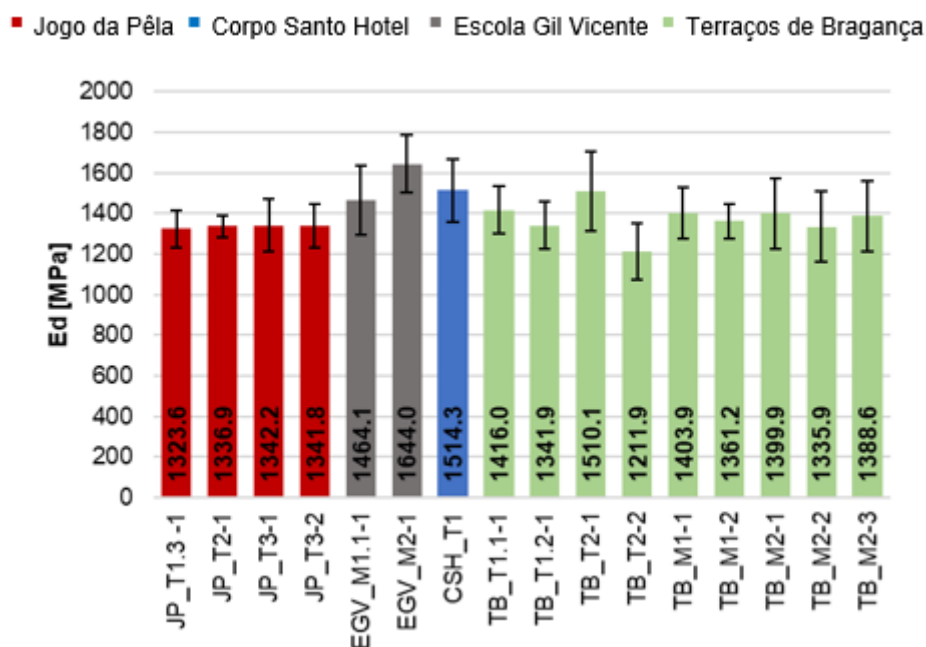


Figura 5.18 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico para os provetes de taipa e argamassa de alvenaria de pedra irregular

Analisando os resultados, o provete EGV_M2.1 (caso de estudo 4 - Escola Básica e Secundária Gil Vicente) foi o que apresentou maior E_d (1644 MPa), o que poderá indiciar uma mais fácil fendilhação do material. Em sentido oposto, o provete com menor valor de E_d foi o TB_T2.2 (caso de estudo 7 – Terraços de Bragança) com 1212 MPa. Este baixo valor pode ser indicativo da presença de microfissuração no interior do provete ou pouca compacidade. Para os provetes dos casos de estudo 1 (Jogo da Péla) e 7 (Terraços de Bragança) os resultados obtidos são da mesma ordem de valores, não apresentando grande dispersão.

Em Cotrim Coradinho (2018) os resultados de módulo de elasticidade dinâmico para as amostras de taipa analisadas são bastante menores em comparação às do presente trabalho, sendo na ordem de valores compreendidos entre 250 e 475 MPa.

5.5.5 Absorção de água por capilaridade

Para a avaliação da absorção de água por capilaridade foram representadas na Figura 5.19, em função da raiz do tempo, as curvas de absorção de água para cada provete. Quanto menores forem os coeficientes de absorção capilar, menor será a absorção de água inicial. Dada a diversidade de provetes, as curvas representadas na Figura 5.20 apresentam comportamentos diferentes, isto é, houve provetes em que a maior absorção se deu logo nos minutos iniciais e outros em que só se registou ao fim de mais tempo, facto este justificado pela diferente composição do material. Os provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular apresentam curvas com comportamentos distintos, provavelmente devido aos diferentes tipos de agregado e traços (Tabela 5.8). Nos provetes de taipa, os fatores que distinguem o comportamento deste tipo de material estará na composição da terra (Tabela 5.3) que os constitui e também o traço (Tabela 5.9). Outro fator, comum em ambos os materiais, poderá ser o facto de os provetes serem ricos em agregado (Tabela 5.6 e Tabela 5.7), o que faz com que a água demore mais a percorrer os espaços vazios do material e tenha influência nas velocidades de absorção.

O coeficiente de absorção capilar foi calculado através do declive do troço linear na fase inicial da curva de capilaridade e mais significativa do ensaio (Figura 5.21). Para uma melhor análise e perceção dos resultados deste ensaio, no Anexo A3, para cada ficha de caso de estudo estão representados em detalhe as curvas de capilaridade dos provetes considerados para a sua realização e a representação da linha de tendência e, ainda, os pontos de pesagem a ela associados para a obtenção do coeficiente de capilaridade.

Através da Figura 5.21 é possível verificar a grande dispersão de comportamentos face à absorção de água. Visualmente podem ser observados dois grupos de provetes com comportamentos diferenciados: o primeiro – constituído pelos provetes JP_T1.3, EGV_M1.1, EGV_M2.1, TB_M2.1, TB_M2.2, TB_M2.3 e CSH_T1.1; o segundo – com os restantes provetes JP_T2.1, JP_T3.1, JP_T3.2, TB_T1.1, TB_T1.2, TB_T2.1, TB_T2.2, TB_M1.1 e TB_M1.2. Face a isto, os provetes TB_M2.1, TB_M2.2 e TB_M2.3 são os que absorvem inicialmente uma maior quantidade de água, sendo evidente que o provete com menor absorção de água é o TB_M1.1, curiosamente todos do mesmo caso de estudo (Terraços de Bragança). Comparativamente ao ensaio *in situ* de absorção de água através dos tubos de Karsten, verifica-se o mesmo comportamento na parede de onde foram extraídos os carotes

TM_M1.1 e TB_M2.1, ou seja, no paramento onde foram colocados os tubos verificou-se uma absorção rápida de água num instante curto de tempo que mais tarde se comprovou através do método da capilaridade, este mais rigoroso e evidente.

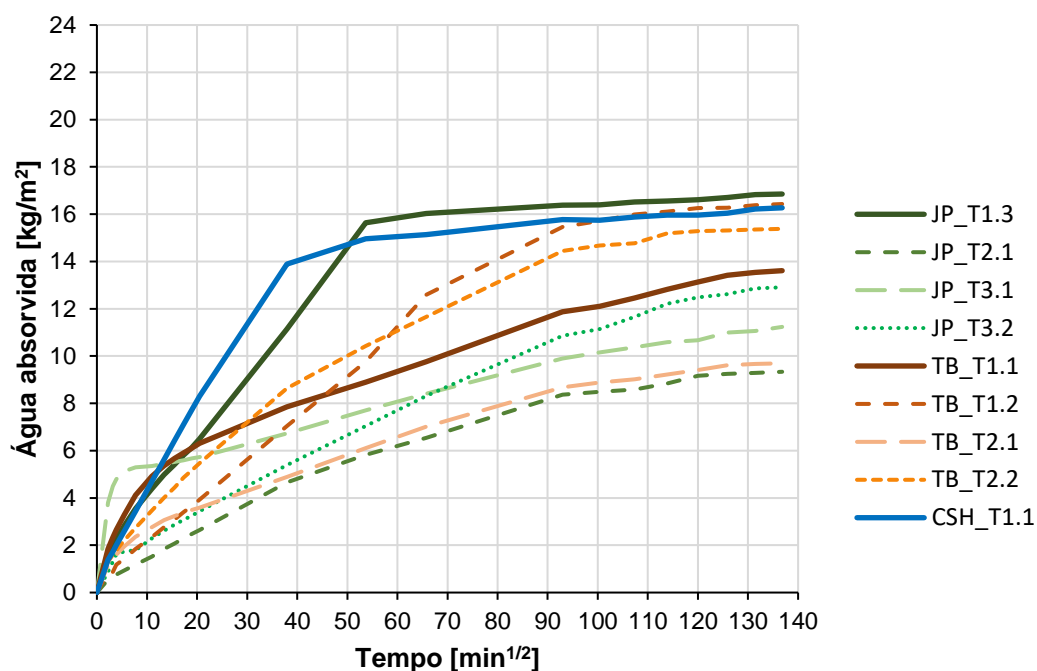


Figura 5.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo – provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular

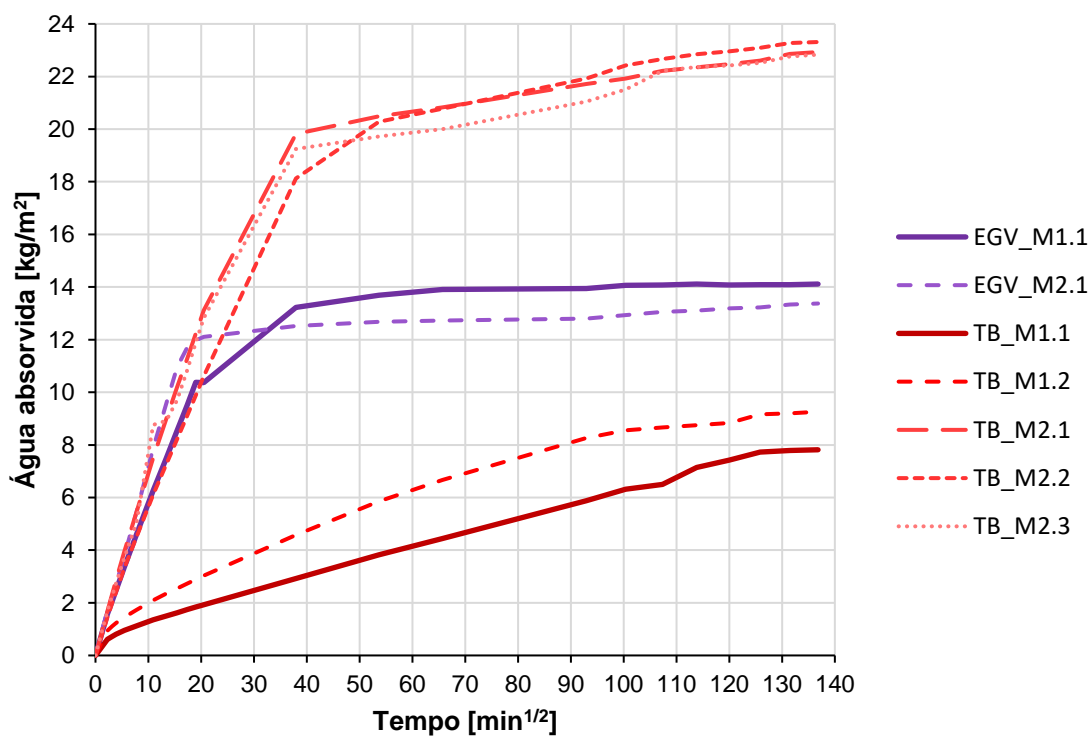


Figura 5.20 - Curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo – provetes de taipa militar

Para os valores de coeficiente de capilaridade (C_c) apresentados na Tabela 5.11, e também com base na representação da absorção nos instantes iniciais no gráfico da Figura 5.21, é possível verificar que o valor médio calculado foi de 0,56 e de 0,52 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ para os provetes de argamassa de pedra irregular e de taipa, respetivamente. O valor do coeficiente de capilaridade é diferente nos dois grupos de provetes, não sendo sempre proporcional à velocidade de absorção no instante inicial do ensaio.

Analisando os resultados individuais dos provetes de argamassa de pedra irregular é visível a elevada discrepância de valores para os provetes das amostras JP_T1, JP_T2 e JP_T3 e da amostra TB_T1. Situação semelhante acontece nos provetes das amostras de taipa com enfoque para as amostras TB_M1 e TB_M2. Opostamente, as restantes amostras têm valores de C_c pouco dispares entre elas. Estes comportamentos distintos entre amostras do mesmo material presumem que, quando o C_c é calculado, a água acesse diferentes tipos de material agregado que influencie a velocidade de absorção inicial. A ocupação do material agregado no interior de cada provete influencia a absorção de água nesta fase, confirmando que a heterogeneidade material apresenta um fator condicionante no cálculo deste parâmetro.

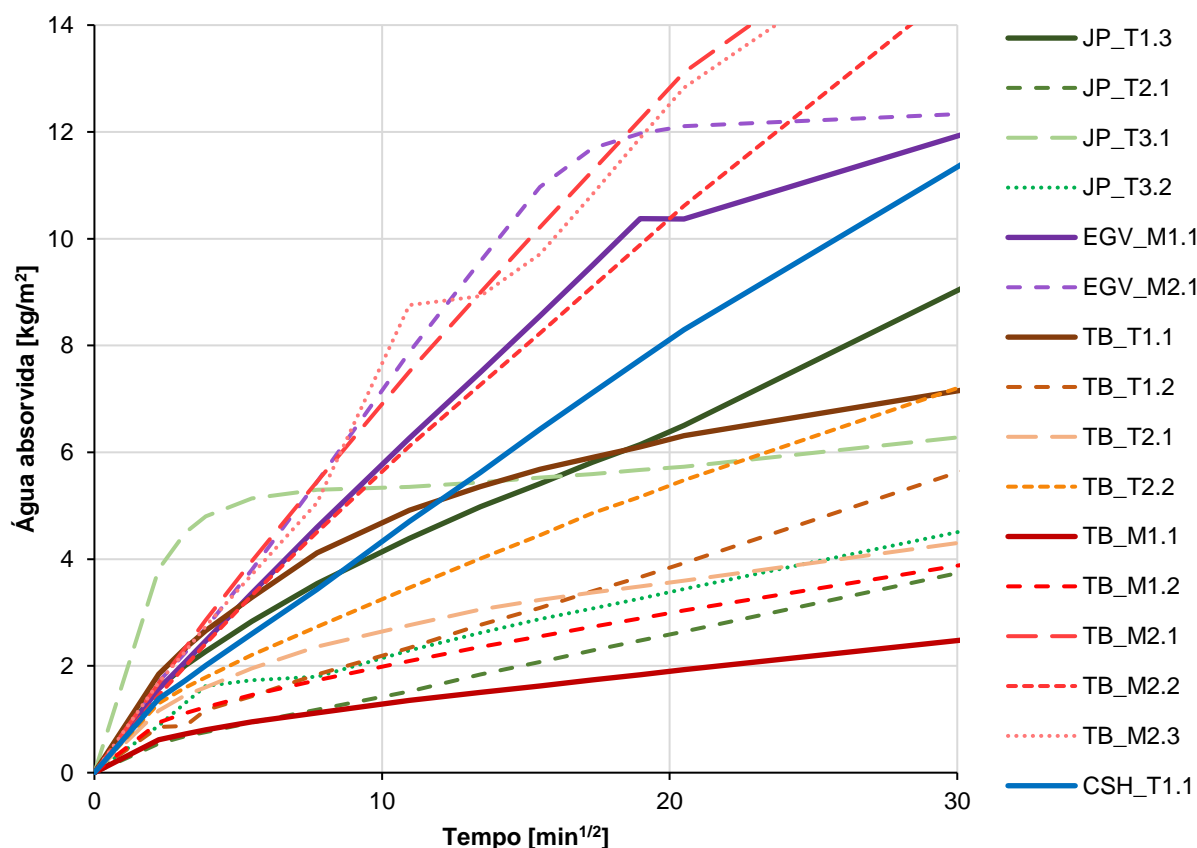


Figura 5.21 – Curvas de absorção de água por capilaridade na fase inicial em função da raiz do tempo

Da análise dos valores de C_c (Tabela 5.12 e na Figura 5.22) também se pode verificar que existe uma diferença significativa de valores para provetes da mesma amostra (mesma carote), inclusive, de amostras extraídas *in situ* do mesmo caso de estudo.

Tabela 5.11 – Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade

Amostra	Provete	Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{1/2})]	
		individual	média
JP_T1	JP_T1.3*	0.71	0.71
JP_T2	JP_T2.1*	0.17	0.17
JP_T3	JP_T3.1*	1.47	0.95
	JP_T3.2*	0.42	
EGV_M1	EGV_M1.1**	0.54	0.54
EGV_M2	EGV_M2.1**	0.69	0.69
TB_T1	TB_T1.1*	0.70	0.44
	TB_T1.2*	0.18	
TB_T2	TB_T2.2*	0.47	0.47
	TB_T2.2*	0.47	
TB_M1	TB_M1.1**	0.27	0.32
	TB_M1.2**	0.36	
TB_M2	TB_M2.1**	0.63	0.60
	TB_M2.2**	0.51	
	TB_M2.3**	0.65	
CSH_T1	CSH_T1***	0.47	0.47

Notação: (*) - Provetes de argamassa de pedra irregular argamassada; (**) - Provetes de taipa; (***) – Provete de argamassa não original da muralha

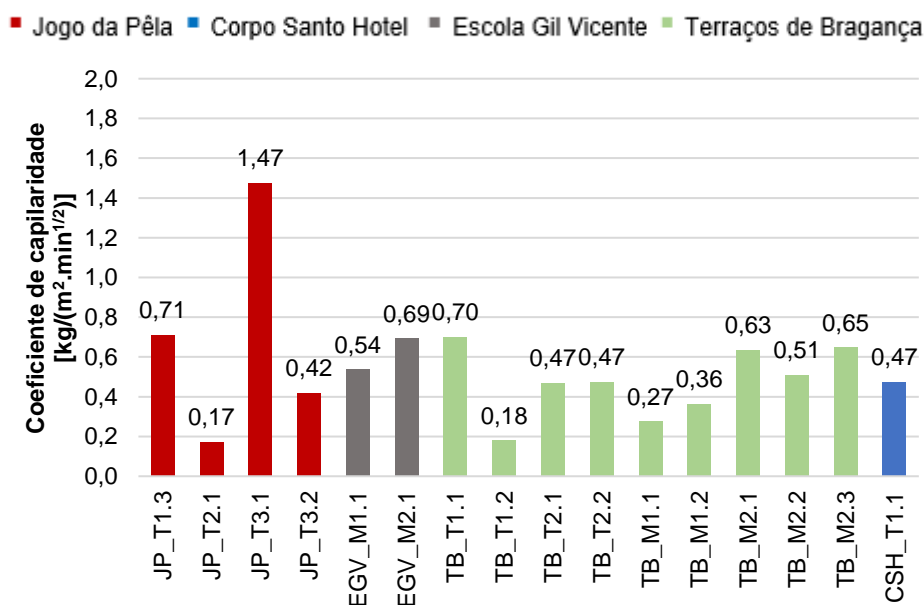


Figura 5.22 – Valores do coeficiente de capilaridade para provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular e de taipa militar

Verifica-se que o maior valor de Cc se verifica no provete JP_T3.1 com 1,47 kg/(m².min^{1/2}), que acaba por estar de acordo com o maior valor médio obtido por amostra (0,95 kg/(m².min^{1/2})). Por outro lado, o provete JP_T2.1 apresenta o valor de Cc mais baixo de apenas 0,17 kg/(m².min^{1/2}). Estes valores podem ser visualizados através da Figura 5.21 na qual, através dos declives, é possível verificar

o maior e menor declive dos troços de reta na fase inicial de absorção para os provetes JP_T3.1 e JP_T2.1, respetivamente.

De referir que durante a execução do ensaio foi possível verificar que a absorção de água ocorria de forma bastante diferenciada entre provetes, dada a heterogeneidade dos materiais constituintes. Nos provetes de taipa foi notória a diferença de absorção entre as amostras EGV_M1 e EGV_M2 e as amostras TB_M1 e TB_M2, confirmando que a taipa é um material completamente diferente nos dois locais distintos, influenciando o comportamento do material de forma significativa.

Comparativamente a resultados com este mesmo tipo de material de estruturas com técnicas de construção idênticas, os valores de coeficiente de capilaridade para as amostras de taipa militar analisadas por Cotrim Coradinho (2018) revelaram valores muito superiores, entre os 1,49 - 2,56 kg/(m².min^{1/2}), muito distantes dos apresentados na presente dissertação. Os valores de coeficiente de capilaridade obtidos por Soudani et al. (2018) na análise do comportamento face à presença de água de provetes de taipa com diferentes percentagens de cal aérea revelaram valores na mesma ordem de grandeza dos aqui ensaiados, sendo por isso espetável que os teores de cal possam ser da mesma ordem. Quando comparados com os resultados de Ferreira (2017) para taipas não estabilizadas com cal da zona de Leiria, verifica-se que os valores de Cc dos provetes de taipa e de argamassa de alvenaria de pedra irregular da Muralha Fernandina de Lisboa são bastante inferiores. Este facto pode estar relacionado com as taipas de Leiria serem de amostras de construções vernaculares e, por isso, realizadas de forma menos cuidada comparativamente a construções defensivas, e também ao tipo de terra utilizada e a tratar-se de taipa não estabilizada com cal.

5.5.6 Secagem

Para a determinação do comportamento das amostras na fase de secagem, foi realizado o ensaio de secagem logo após a conclusão da absorção de água por capilaridade e, com base nas curvas de secagem em relação ao tempo (Figura 5.23) e à raiz quadrada do tempo (Figura 5.24), foram determinadas as duas taxas de secagem, correspondentes à fase 1 (TS1) e fase dois (TS2). No Anexo A3, à semelhança da capilaridade, são apresentadas, para cada provete analisado, as respetivas curvas de secagem, com a representação da linha de tendência dos pontos considerados para esse efeito.

Observando os valores individualmente presentes na Tabela 5.12, o provete CSH_T1.1 é o que apresenta a maior TS1, o que já não se verifica na segunda fase, no qual o provete JP_T1.3 é o que tem a maior TS2. Em termos dos valores mais baixos, o provete de taipa TB_M1 é aquele que tem o menor valor de TS1, enquanto o provete TB_T2 na fase 2 é o que demora mais a secar. Esta diferença significa que o transporte de água no estado líquido até à superfície, numa primeira fase, é baixo e, por outro lado, a difusão em vapor de água é por vezes elevada, na segunda fase.

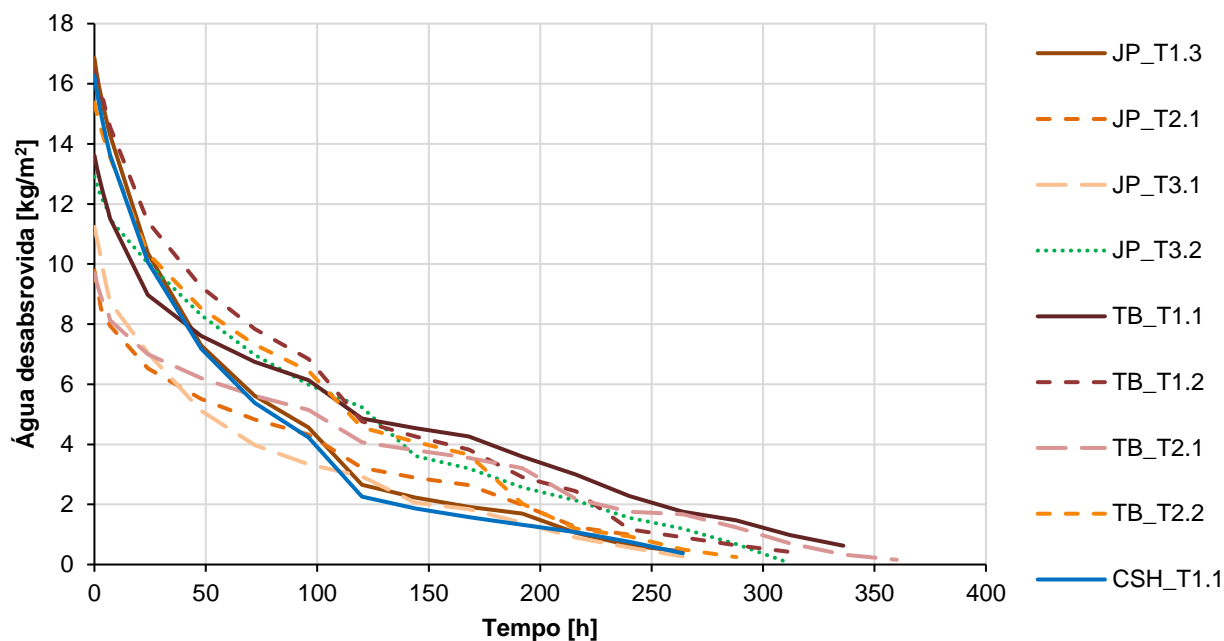


Figura 5.23 – Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1) – provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular

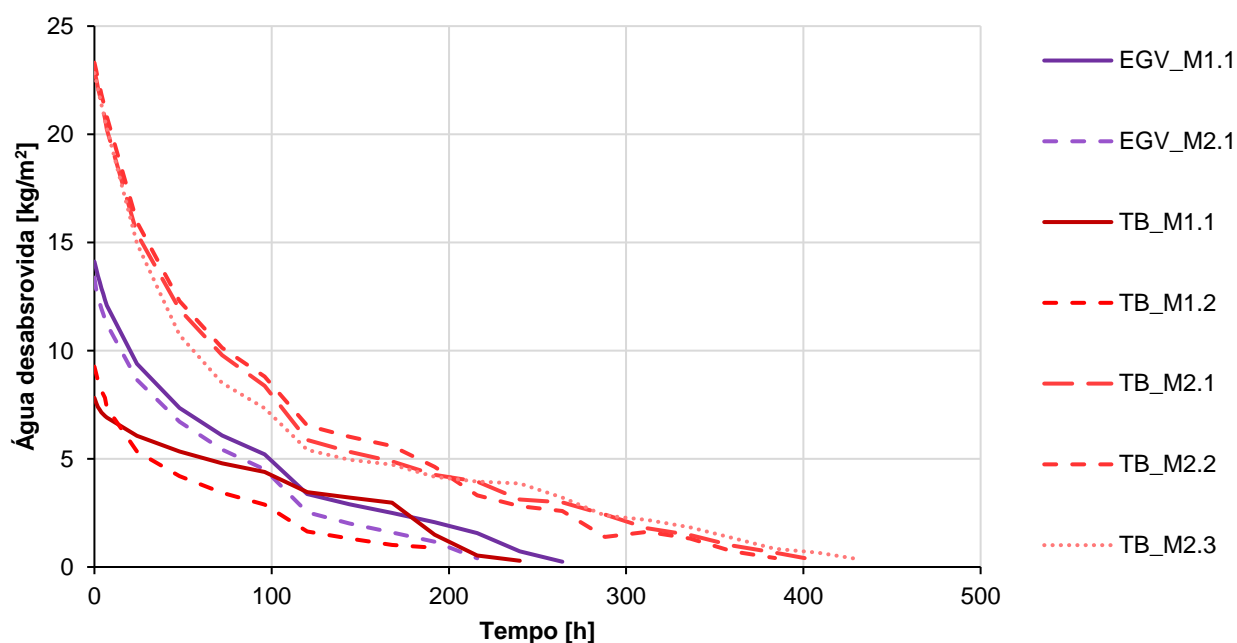


Figura 5.24 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS1) – provetes de taipa militar

Na Figura 5.25 apresentam-se as duas taxas de secagem para todos os provetes. A capacidade de secagem em ambas as fases é evidente nos provetes JP_T3.1 e CSH_T1.1 visto apresentarem os valores das correspondentes taxas.

Tabela 5.12 – Valores individuais e médios das taxas de secagem

Amostra	Provete	TS1 [kg/(m ² .h)]		TS2 [kg/(m ² .h ^{1/2})]	
		individual	média	individual	média
JP_T1	JP_T1.3	0.26	0.26	1.63	1.63
JP_T2	JP_T2.1	0.25	0.25	0.93	0.93
JP_T3	JP_T3.1	0.36	0.28	1.49	1.08
	JP_T3.2	0.19		0.67	
EGV_M1	EGV_M1.1	0.19	0.19	1.03	1.03
EGV_M2	EGV_M2.1	0.18	0.18	0.96	0.96
TB_T1	TB_T1.1	0.29	0.25	1.14	1.07
	TB_T1.2	0.20		1.00	
TB_T2	TB_T2.1	0.21	0.21	0.21	0.56
	TB_T2.2	0.20		0.91	
TB_M1	TB_M1.1	0.12	0.19	0.37	0.56
	TB_M1.2	0.25		0.76	
TB_M2	TB_M2.1	0.31	0.31	1.53	1.40
	TB_M2.2	0.30		1.35	
	TB_M2.3	0.33		1.31	
CSH_T1	CSH_T1.1	0.37	0.37	1.42	1.42

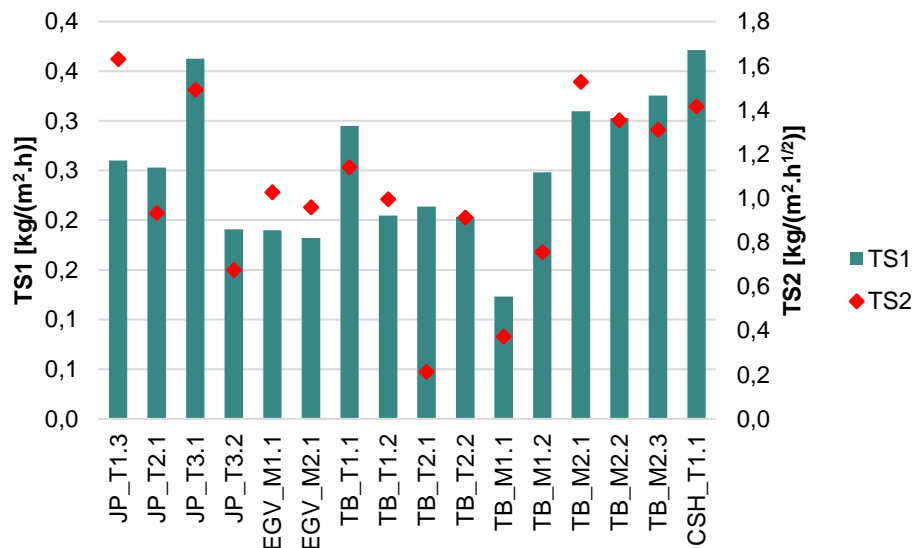


Figura 5.25 – Taxas de secagem nas duas fases do ensaio

Os resultados de Cotrim Coradinho (2018) são bastante parecidos com os da presente dissertação, pois as taxas de secagem obtidas encontram-se no mesmo intervalo de valores. Face aos resultados da secagem obtidos por Lima (2017), para argamassas de reboco à base de terra, os valores da TS1 apresentam valores muito semelhantes aos provetes de terra das amostras EGV_M1 e EGV_M2. Gomes et al. (2018) ensaiou argamassas de cal hidratada de reparação de taipa tendo obtido

resultados, para ambas as taxas de secagem, semelhantes aos de taipa da muralha Fernandina nos casos da argamassa com argila na sua composição. Para as amostras de Leiria analisadas por Ferreira (2017) e mais tarde por Parracha et al. (2019), estas, na TS1 apresentam valores praticamente iguais entre si sendo da mesma ordem de valores das amostras de taipa EGV_M1 e EGV_M2. Na TS2 o mesmo não se verifica, sendo maiores os valores para as amostras da presente dissertação, este facto pode ser justificado pela diferença de dimensões entre os provetes de taipa seleccionados serem superiores aos do presente estudo.

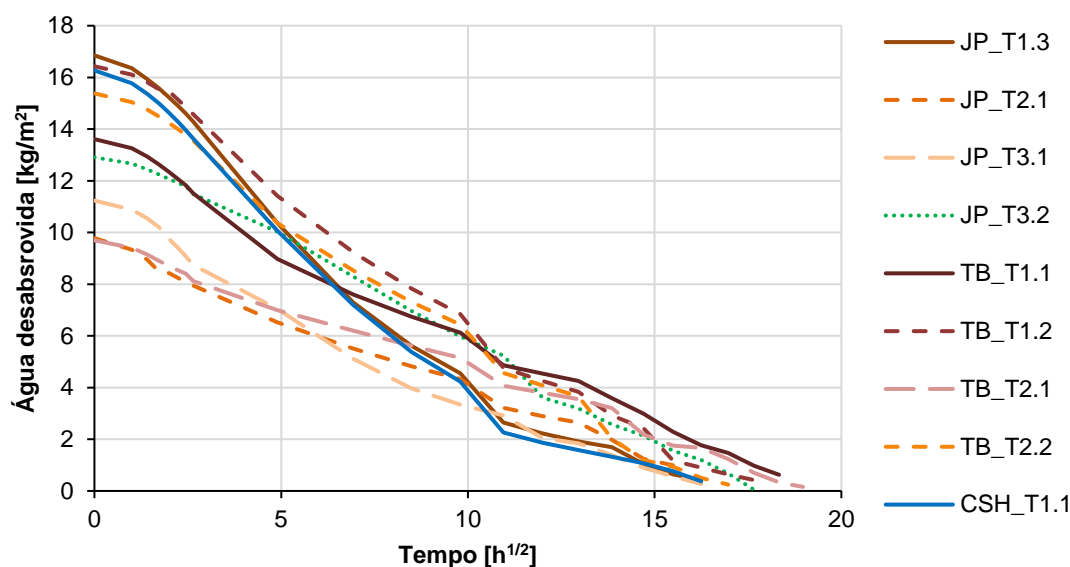


Figura 5.26 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS2) – provetes de alvenaria de pedra irregular argamassada

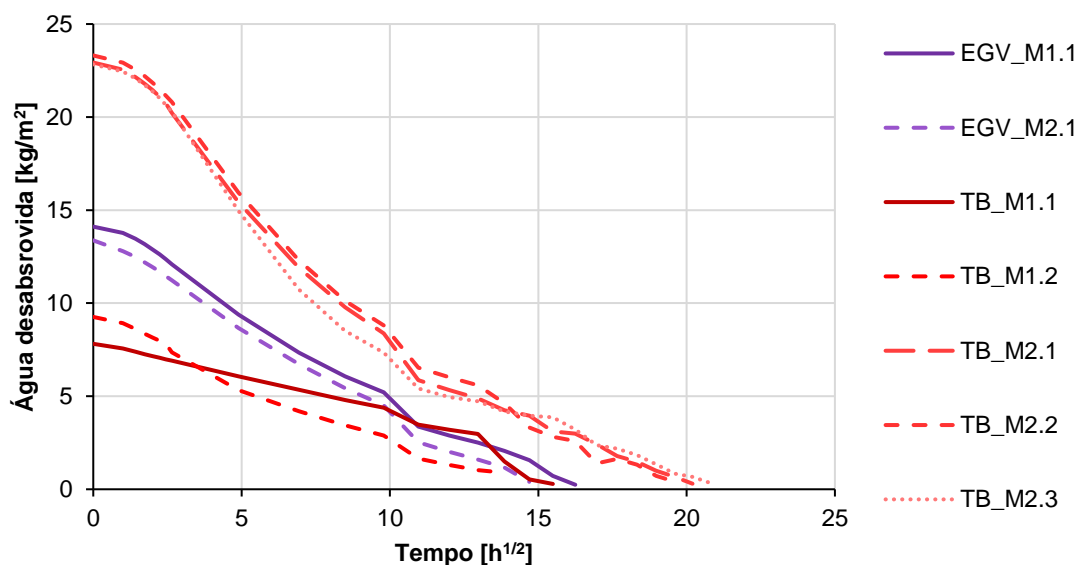


Figura 5.27 – Curvas de secagem em função do tempo, em horas, na primeira fase de secagem (TS2) – provetes de alvenaria de taipa militar

5.5.7 Resistência à compressão diametral

Os resultados da força máxima, $F_{\text{máx}}$, em N, encontram-se presentes na Tabela 5.13.

Começou-se por realizar o ensaio nos provetes de argamassa de alvenaria de pedra irregular calcária os quais revelaram, como era esperado, valores de força máxima muito elevados, que se atribuiu à grande quantidade de agregado e à elevada compacidade das argamassas. O maior valor foi registado no provete JP_T2.1 com 11077,44 N, enquanto o menor foi no provete JP_T1.3 com 3301,97 N, ambos do mesmo caso de estudo, mas de locais de extração diferentes. No caso do maior valor, o ensaio decorreu como esperado, tendo-se registado o plano de rotura do provete ao longo do seu comprimento, rompendo por tração devido ao efeito de Poisson.

Para os provetes de taipa, os resultados obtidos são relativamente mais baixos dos que se obtiveram nos anteriores de alvenaria de pedra argamassada. O provete EGV_M1.1 foi o que apresentou o valor mais baixo, tendo apenas resistido a uma força de 921 N. Pelo traço desta amostra (Tabela 5.9) é possível justificar este valor tão baixo, pois é notória a baixa quantidade tanto de agregado calcário como de terra. Araki et. al (2015) utilizou a mesma técnica embora com provetes de maiores dimensões. No presente estudo, os provetes ensaiados apresentam resultados na mesma ordem de valores aos de taipa analisados por Araki et al. (2015), sendo que os provetes TB_M1.1 e TB_M1.2 têm valores ligeiramente superiores. Esta diferença deve justificar-se por estes provetes apresentarem massa volúmica aparente superior

Tabela 5.13 – Força máxima de compressão diametral e tensão de tração σ_{ts}

Amostra	Provete	Massa [g]	Altura h [mm]	Diâmetro ϕ [mm]	$F_{\text{máx}}$ [N]	σ_{ts} [kPa]
JP_T1	JP_T1.3	511.854	74.67	74.88	3301.97	375.96
JP_T2	JP_T2.1	690.576	74.66	74.57	11077.44	1266.68
JP_T3	JP_T3.1	604.51	74.65	74.52	11056.38	1265.29
	JP_T3.2	581.468	74.92	74.51	9177.24	1046.60
EGV_M1	EGV_M1.1	558.708	76.94	72.16	920.76	105.58
EGV_M2	EGV_M2.1	611.421	76.5	73.29	1721.89	195.51
CSH_T1	CSH_T1	598.247	76.79	73.28	9739.97	1101.91
TB_T1	TB_T1.1	623.559	74.74	74.7	6439.96	734.33
	TB_T1.2	589.416	75.01	74.45	5624.78	641.21
TB_T2	TB_T2.1	624.574	74.53	74.48	7113.89	815.86
	TB_T2.2	539.784	75.16	74.46	5285.01	601.20
TB_M1	TB_M1.1	588.07	75.12	74.45	10328.81	1175.74
	TB_M1.2	589.906	75.24	74.34	9108.16	1036.67
TB_M2	TB_M2.1	559.112	75.24	74.36	4509.71	513.15
	TB_M2.2	544.614	75.21	74.06	3121.7	356.79
	TB_M2.3	546.887	74.6	73.61	1254.91	145.48

Em alguns provetes foi notório que o ensaio não decorreu nas características que se eram de esperar, ou seja, no caso dos provetes de pedra irregular calcária argamassada em que a heterogeneidade dos materiais é um facto relevante, ocorreram casos em que os provetes romperam por corte na zona da

argamassa e não diametralmente como esperado. Para evitar este efeito teria sido necessário efetuar o ensaio com provetes cilíndricos, mas de maior altura, o que não foi possível devido a constrangimentos no número de amostras.

Os provetes de taipa do caso de estudo 7 (Terraços de Bragança) confirmaram ser mais resistentes do que os do caso de estudo 4 (Escola Gil Vicente) devido à $F_{máx}$ registada em cada um. São visíveis as diferenças de ambos os casos através das quantidades substanciais de areia e partículas finas constituintes da matriz terra de cada um dos provetes, que contribuem com grande relevância para a resistência à compressão diametral deste tipo de material.

6 Conclusões

6.1 Considerações finais

Com o aumento do interesse em preservar e conservar o património arquitetónico e arqueológico, torna-se pertinente consciencializar a sociedade para a importância dessa salvaguarda. Envolve valores culturais e sociais, que por sua vez englobam aspetos técnicos, que interessa conhecer para que a eficiência das intervenções de conservação e restauro seja cumprida. A caracterização tecnológica e material constitui um dos parâmetros imprescindíveis para corretas metodologias para a conservação das construções, particularmente quando são realizadas intervenções no património edificado.

A Muralha Fernandina de Lisboa contempla um leque de informação, muita dela desconhecida, importante para a caracterização de técnicas de construção antigas e emprego de materiais com características próprias e distintas dos aplicados atualmente na construção. Atualmente assiste-se a um crescente interesse em detalhar esse conteúdo para esse tipo de estruturas, muito pelo trabalho realizado nos últimos anos por técnicos de várias especialidades, tais como engenheiros, arquitetos, arqueólogos, conservadores e historiadores, entre outros.

A análise da bibliografia revelou a grande lacuna que existe nos estudos, sobretudo de caracterização material da Muralha Fernandina de Lisboa. A grande maioria de informação existente centra-se sobretudo no contexto de intervenções de carácter arqueológico e histórico-militar. Por esta razão, considerou-se importante promover este estudo, obtendo dados complementares sobre esta estrutura. Desta forma surge o objetivo e a metodologia da presente dissertação, onde é feita uma análise visual através de visitas e inspeções realizadas em sete troços da muralha localizados no centro da cidade de Lisboa, a que se acrescentaram dois casos de estudo inspecionados em intervenções realizadas em anos anteriores. Foi também realizada uma pequena campanha experimental de caracterização *in situ*, a recolha possível e a caracterização em laboratório de amostras, para obtenção de resultados sobre a constituição material da muralha.

Da análise dos casos de estudo, a estrutura amuralhada surge de diversas formas – muros, torres ou cubelos e portas ou postigos -, apresentado diferenças significativas entre si no que diz respeito ao estado de conservação, à exposição e composição material, bem como a sua utilização, ambientes, manutenção, intervenções realizadas e necessárias, e até à propriedade e materiais constituintes. Observaram-se troços constituídos por alvenaria de pedra argamassada, cunhais e socos com alvenaria de pedra aparentemente aparelhada e ainda troços em taipa.

Felizmente, ultimamente os vestígios desta grande estrutura têm sido seguidos e acompanhados por profissionais experientes da Câmara Municipal de Lisboa e da Direção-Geral do Património Cultural, o que revela um bom prognóstico para o futuro. Também a maioria dos proprietários privados têm neste momento a consciência da importância do significado do património cultural que possuem nas suas propriedades, tornando-se desta forma seus “guardiões” e, de um modo geral, recetivos a intervenções adequadas. Estes factos foram bastante perceptíveis nos casos de estudo 5 (Palácio da Rosa) e 6 (Corpo Santo Hotel), bem como também na propriedade privada no caso de estudo 2 (Calçada de Santana) com o pequeno cubelo incorporado, e no complexo de apartamentos que constituem o caso

de estudo 7 (Condomínio dos Terraços de Bragança). Este último representa um dos melhores troços em taipa da muralha, necessitando urgentemente de ser inspecionado de forma detalhada para avaliar a necessidade de atuação, principalmente devido a intervenções vizinhas recentes e alterações da exposição ambiental desde a construção do complexo e obras em construções adjacentes. Nos casos de estudo sob gestão pública, nomeadamente os casos de estudo 1 (Torre do Jogo da Péla), 3 (Palácio da Independência) e 4 (Escola Básica e Secundária Gil Vicente), poderão apresentar mais e maiores problemas para a manutenção da muralha face ao reduzido apoio financeiro que por muitas vezes é disponibilizado para este tipo de intervenções e para a proteção deste tipo de estruturas.

Os ensaios *in situ* não destrutivos realizados nos diferentes locais visitados provaram ser interessantes pela sua fácil e rápida interpretação. Embora não se tenha conseguido obter resultados para todos os casos de estudo por limitações de acesso, os valores que se obtiveram mostram consistência para o material que é avaliado. Para esta caracterização experimental *in situ*, os materiais constituintes revelaram, através dos ensaios de resistência superficial pelo esclerómetro superficial e pelo ensaio de choque de esfera, boas características de resistência, principalmente nas paredes principais da muralha. Quanto ao comportamento da água, os resultados são diferentes para as distintas secções visitadas. No entanto, os resultados de absorção de água aparentam ser satisfatórios face aos materiais em presença.

Os ensaios químicos e mineralógicos possibilitaram a determinação dos constituintes e traço das amostras, tanto de taipa como dos da matriz de argamassa da alvenaria de pedra calcária irregular. Os traços determinados mostram uma grande diversidade de materiais empregues na muralha. Nos provetes das amostras recolhidas verifica-se sempre uma quantidade de areia siliciosa superior à proporção de cal aérea/agregado calcário, exceto no provete PI_M com um traço de 1:3,3:3,2 (cal aérea : agregado calcário : areia siliciosa) em massa. Nos provetes de taipa os traços verificados vão de uma gama de 1:0,1 a 1:9,0 (cal aérea : agregado calcário), de 0,3 a 4 de terra e de 1,8 a 28,5 de areia siliciosa, também em massa, conforme a localização associada a cada caso de estudo.

Como esperado, as amostras revelaram diferentes composições, com diversos tipos e dimensões de agregados a diferentes tipos de ligante (cal aérea ou argila) e argamassas com diferentes traços.

No caso das amostras de taipa recolhidas, constatou-se a presença de diferentes tonalidades face ao tipo de terra utilizada na sua execução, sendo o muito provável aproveitamento do material mais próximo da localização da construção um dos fatores que distingue a curta duração da construção da Muralha Fernandina de Lisboa. As amostras de taipa do caso de estudo 4 (Escola Básica e Secundária Gil Vicente) apresentam uma menor coesão e regularidade face às extraídas no caso de estudo 7 (Condomínio dos Terraços de Bragança), o que justifica a baixa compacidade traduzida também nos baixos valores de condutibilidade térmica obtidos com provetes do caso de estudo 4. A dureza superficial da taipa em ambos os casos de estudo 4 e 7 revelou na generalidade elevados valores, confirmando a elevada resistência que a estrutura militar teria de apresentar face à defesa da cidade. Os valores de resistência superficial traduzem essa elevada resistência em todos os casos de materiais distintos, pois estão sempre acima dos 90 Shore A, excetuando-se os provetes do caso de estudo 4 no qual a resistência é um pouco mais baixa - na ordem dos 78 – 88 Shore A.

Os provetes, tanto os de taipa como os de alvenaria de pedra calcária irregular argamassada, apresentam valores médios de massa volúmica muito semelhantes entre si, sem ocorrência de grandes

discrepâncias e não muito diferentes de outros resultados de estudos anteriores analisados na pesquisa bibliográfica. Os valores dos coeficientes de capilaridade e taxas de secagem obtidos revelaram diferentes comportamentos face à presença de água. O Cc médio registado nos provetes encontra-se no intervalo de valores 0,17 – 0,95 kg/(m².min^{1/2}). Os valores das TS1 e TS2 estão entre os 0,12 - 0,25 kg/(m².h) e os 0,56 – 1,63 kg/(m².h^{1/2}), respetivamente. Os provetes apresentam assim, no geral, valores de TS1 mais baixos e de TS2 mais elevados, indiciando que a secagem se efetua maioritariamente na segunda fase, por dissipação de vapor. Este facto pode indicar a predominância de poros de tamanho mais pequeno, o que faz com que a água demore a percorrer os espaços vazios e consequentemente ocorra uma absorção mais lenta de água.

Em termos de resistência à compressão diametral, executada em provetes que não apresentavam comprimento superior ao dobro do seu diâmetro, os provetes de argamassa apresentam um valor médio de 872 kPa para os provetes de pedra calcária irregular argamassada e de 504 kPa para os provetes de taipa. Em certos pontos da extensão da muralha os resultados são mais favoráveis face a outros locais. Comparativamente a outros estudos de taipa e alvenarias argamassadas, os provetes cilíndricos apresentaram uma fratura na maioria dos casos ao centro, mas por vezes inclinada, tal como aconteceu no estudo de Hanamasagar e Girinivas (2017), sendo que as propriedades do material influenciam em muito os resultados da tensão suportada pelo provete.

Concluída a dissertação, e face aos objetivos principais deste trabalho – contributo para a caracterização material da muralha Fernandina de Lisboa – considera-se que foram devidamente alcançados e cumpridos, tendo em conta os condicionantes de acesso e amostragem existentes. Espera-se que os resultados alcançados possam ser úteis como suporte nas futuras decisões, nomeadamente na aplicação de argamassas de reparação que necessitam de ser compatíveis e assegurar a eficiente conservação dos sectores da muralha a intervencionar.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Um trabalho de investigação levanta sempre um conjunto de ideias e propostas para futuros estudos visando aprofundar essa temática. No presente caso as propostas são:

- Realização de inspeções em diferentes troços da Muralha Fernandina de Lisboa, e em particular no lanço Oriental, dado que só se analisou um local desta zona da estrutura, e proceder a recolha de amostras com consequente caracterização visual e material.
- Obtenção de amostras com maior comprimento, idealmente por carotagem, para uma melhor avaliação estratigráfica e material da constituição da muralha.
- Realizar a caracterização microestrutural das amostras existentes e complementar essa análise com os resultados obtidos dos ensaios químicos, mineralógicos e físico-mecânicos.
- Executar a caracterização material e um levantamento das intervenções realizadas até ao momento na Muralha Fernandina do Porto e fazer a respetiva comparação com a muralha de Lisboa.
- Em articulação com a Câmara Municipal de Lisboa e a Direção-Geral do Património Cultural colaborar na criação de uma plataforma informativa, por exemplo na Torre do Jogo da Péla, com informação detalhada sobre a muralha visando dar a conhecer aos cidadãos a existência deste monumento na cidade de Lisboa e sensibilizá-los face à sua preservação.

Referências

- Araki, H.; Koseki, J.; Sato, T. (2016). Tensile strength of compacted rammed earth materials. *Soils and Foundations*, 56 (2), p. 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.003>
- Archeofactu (2013). Cubelo do Postigo de Santana: conservação e restauro - plano de intervenção. Relatório, Lisboa.
- ASTM (2014). ASTM C136/C136M: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM Standarts: United States.
- ASTM (2008). ASTM C805-08: Standard test method for rebound hammer of hardened concrete. ASTM Standarts: United States.
- ASTM (2010). ASTM D2240-05: Standard test method for rubber property. ASTM Standarts: United States.
- Banha, R.; Nozes, C.; Vieira, V.; Vicente, A.; Lopes, G.; Miranda, P. (2012). Largo do Chafariz de Dentro: Alfama em época moderna. Velhos e Novos Mundos, Estudos de Arqueologia Moderna. Volume I. Lisboa: Centro de História de Além-Mar, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas - Universidade Nova de Lisboa e Universidade dos Açores. Lisboa/Ponta Delgada.
- Brito, R. (1998). Contribuição geológica para a recuperação da Torre do Jogo da *Péla* (Muralha Fernandina de Lisboa). Dissertação de Mestrado em Geologia Aplicada e do Ambiente. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Brito, V.; Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2011). Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport. *J. Coating Technology and Research*, 8 (4), p. 531-525. DOI: 10.1007/s11998-010-9319-5. <http://www.springerlink.com/content/a02507t631746v35/fulltext.pdf>
- Bruno, P., Faria, P., Candeias, A., Mirão, J. (2010). Earth mortars use on pre-historic habitat structures *in* Southern Portugal. Case studies. *Journal of Iberian Archaeology*, 13, p. 51-67.
- Bruno, P. (2000). A Fortaleza de Juromenha: contributo para o estudo e a conservação da muralha islâmica de taipa militar. Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora.
- BSI (1983). BS 1881 - Part 117: Testing concrete. Method for determination of tensile splitting strength. London, United Kingdom.
- Bui, Q. (2017). Assessing the rebound hammer test for rammed earth material. *Sustainability*, 9, p. 11–17. <https://doi.org/10.3390/su9101904>
- Campos, J. (1985). A Propósito das Muralhas de Lisboa. Edições Guimarães.
- Casanova, E. (1892). Traçado das Muralhas de Lisboa. Biblioteca Nacional de Portugal. Biblioteca Nacional Digital. Lisboa. <http://purl.pt/1524/3/>
- CEN (2009). EN 15801: Conservation of cultural property - Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.
- CEN (2013a). EN 16302: Conservation of cultural heritage - Test methods. Measurement of water absorption by pipe method. Brussels.
- CEN (2013b). EN 16322: Conservation of cultural heritage - Test methods. Determination of drying properties. Brussels.

- Correia, M. (2010). Abordagem às técnicas construtivas. As Idades da Construção: Técnicas e saberes da construção tradicional e sua aplicação à arquitetura contemporânea. Arquitetura de terra em Portugal. Lisboa: Argumentum, p. 61-71
- Cotrim Coradinho, M. (2018). Castelo de Paderne – Caracterização histórica e material. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Cotrim, M.; Faria, P.; Santos Silva, A. (2018). Conservação das muralhas de taipa militar do Castelo de Paderne – Uma história de intervenções. Construção 2018, FEUP, Porto.
- DIN (2013). DIN 18946: Earth masonry mortar - Terms and definitions, requirements, test methods. Berlin.
- Faria, P.; Henriques, F. (2006). Construções em terra: conservação do património existente e perspectivas futuras. PATORREB 2006 - 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, Porto, p. 273-282.
- Faria, P.; Silva, V.; Jamú, N.; Dias, I.; Gomes, I. (2013). Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders. Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development, M. Correia, G. Carlos, S. Rocha (Eds.), CRC Press/Taylor & Francis Group, London, p. 407-43.
- Faria, P.; Silva, V.; Pereira, C.; Rocha, M. (2012). The monitoring of rammed earth experimental walls and characterization of rammed earth samples. Rammed Earth Conservation, Mileto, Vegas & Cristini (eds.), Taylor & Francis Group, London, p. 91-97
- Feliciano, M.; Leite, A. (2010). A Cerca Fernandina na Colina de Santana: Presença, Memória e Resignificação como Estratégia de Reabilitação para a Contemporaneidade. Seminário Património Hospitalar de Lisboa: Que futuro? ICOMOS Portugal. CHLC. Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- Fernandes, M. (2014). Troço de Muralha Fernandina existente no interior do edifício sito em Lisboa na Rua António Maria Cardoso 9-13. Parecer de proposta de tratamento. Informação Nº /DEPOF/2014. DGPC - Departamento de Estudos, Projectos, Obras e Fiscalização. Lisboa.
- Fernandes, M. (2016a). Parecer referente ao tratamento da Muralha Fernandina, sito no logradouro dos Bombeiros no Largo da Graça/Rua da Verónica em Lisboa (S. Vicente de Fora). Informação Nº /DEPOF/2016. DGPC - Departamento de Estudos, Projectos, Obras e Fiscalização. Lisboa.
- Fernandes, M. (2016b). Parecer referente ao tratamento da Muralha Fernandina, sito no Telheiro de S. Vicente em Lisboa (S. Vicente de Fora). Nº 368/DEPOF/2016. DGPC - Departamento de Estudos, Projectos, Obras e Fiscalização e Divisão de Execução de Obras e Fiscalização. Lisboa.
- Ferreira, M. (2017). Caracterização da construção com terra da região de Leiria. Contributo para a sua conservação. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Ferro, R. (2017). No limite da memória: A Cerca Fernandina como catalisador da reabilitação do Convento da Encarnação e sua envolvente. Dissertação de Mestrado em Arquitetura. Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

- Gomes, L.; Silva, V.; Faria, P.; Silva, A. (2019). Fernandina old Wall of Lisbon – Characterization towards its preservation. 5th Historic Mortars Conference - HMC 2019. University of Navarra, Pamplona.
- Gomes, M.; Faria, P.; Gonçalves, T. (2018). Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness. *Construction and Building Materials*, 205, p. 213–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.222>
- Harris, E. (1989). *Principles of archaeological stratigraphy*. M. M. Bermuda, M. Bay e Bermuda (Eds.), 2nd Edition. Academic Press Harcourt Brace and Company. London.
- Hanamasagar, M.; Girinivas, K. (2017). Shape and Size Effects on the Compressive strength of stabilized rammed earth both in wet and dry condition. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5, p. 1210–1217. <http://ijraset.com/files/serve.php?FID=9978>
- IPQ (2006). NP EN 14146: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Caparica.
- IPQ (2008). NP EN 1936: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica.
- Krus, A. (2017). Relatório Final - Trabalhos arqueológicos: Rua do Terreiro do Trigo 6-26, Santa Maria Maior. Lisboa.
- Leitão, M. (2014). Muralhas de Lisboa. *Revista Rossio. Estudos de Lisboa* Nº 3, p. 75–78.
- Lima, J.; Faria, P.; Ferreira, M. (2017). Rebocos de terra: caracterização higroscópica e face à presença de água líquida. CREPAT 2017 - Congresso da Reabilitação do Património, Aníbal C., Ana V., Alice T. (Eds.), Universidade de Aveiro, p. 21–29.
- LNEC (1980). FE Pa 25: Fichas de ensaio de revestimentos de paredes. Ensaio de choque de esfera. Lisboa.
- LNEC (2015). FE Pa 43: Fichas de ensaio de revestimentos de paredes. Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultrassons. Lisboa.
- LNEC (2016). FE Pa 49.1: Fichas de ensaio para revestimentos de paredes. Ensaio de avaliação da dureza superficial do reboco com durómetro. Lisboa.
- LNEC (2016). FE Pa 39: Métodos de ensaio para revestimentos de paredes existentes. Lisboa.
- Lopes, F. (1975). *Crónica de D. Fernando*. Volume 2. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda. Lisboa.
- Gonçalves, A. (1994). *Dicionário da História de Lisboa: Palácio da Rosa*. Eduardo S. (Eds.). Lisboa.
- Martins, M. (2001). *Lisboa e a Guerra: 1367 - 1411*. Obras clássicas da literatura portuguesa. Livros Horizonte, Lisboa.
- Mileto, C.; López-Manzanares, F.; García-Soriano, L. (2018). La restauración de la tapia monumental: pasado, presente y futuro. *Informes de la Construcción*, 69 (548), p. 231-243. <https://doi.org/10.3989/ic.16.160>
- Oliveira, I. (2017). Caracterização das Casas Caramelas do concelho de Palmela - Contributo para a sua conservação. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

- Oliveira, J.; Manso, C. (2018). Relatório Final: Intervenção Arqueológica - Parque de Estacionamento da Graça. Lisboa.
- Oliveira, E. (1887). Elementos para a História do Município de Lisboa. Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa
- Parracha, J.L.; Santos Silva, A.; Cotrim, M.; Faria, P. (2019). Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. *Journal of Cultural Heritage*, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.021>
- Parracha, J.L.; Lima J.; Freire, M.T.; Ferreira M.; Faria P. (2019), Vernacular Earthen Buildings from Leiria, Portugal: Material characterization. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668986>
- Pinto, S. (-). A Heráldica do Palácio da Rosa. Lisboa.
- Portugal, E. (1948). Espólio do Arquivo Municipal de Lisboa/Fotográfico. Lisboa.
- Santos, T.; Faria, P.; Silva, V. (2019). Can an earth plaster be efficient when applied on different masonries ? *Journal of Building Engineering*. 23, p. 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.011>
- Soudani, L.; Fabbri, A.; Woloszyn, M.; Grillet, A.; Morel, J.; (2018). Hydric characterisation of rammed earth samples for different lime concentrations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 143, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012010>
- Vale, J. (2018). A Cerca Fernandina como matriz de evolução da «Nova cidade» de Lisboa. Revitalização do Convento da Encarnação com a criação de um «Pólo Cultural». Dissertação de Mestrado em Arquitectura. Faculdade de Arquitectura da Universidade de Lisboa.
- Valles, C. (2014). Calçada de Santana Nº 131 a 137. Relatório Prévio – Arquitetura. Carlos Sousa Valles Arquitetos.
- Valongo, A.; Casimiro, T. (2017). Uma lixeira nas casas nobres do infantado. *Arqueologia em Portugal*. José A., Andrea M. (Eds.). Lisboa, p. 1835-1848.
- Varandas, J. (2004). Construção em taipa de réplica da muralha Fernandina. *Pedra e Cal* 24, p. 26.
- Veiga, M.; Velosa, A.; Magalhães, A. (2009). Experimental applications of mortars with pozzolanic additions : characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials* 23, p. 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003>
- Vieira da Silva, A. (1987a). A Cerca Fernandina de Lisboa, Volume I, 2a Edição. Lisboa: Publicações Culturais da Câmara Municipal de Lisboa.
- Vieira da Silva, A. (1987b). A Cerca Fernandina de Lisboa, Volume II, 2a Edição. Lisboa: Publicações Culturais da Câmara Municipal de Lisboa.
- W1: <https://www.guiadacidade.pt/pt/destino/poigf/17841> (acedido em 27-02-2019)
- W2: <https://www.museudodinheiro.pt/patrimonio/2/muralha-d-dinis> (acedido em 04-03-2019)
- W3: <https://jpcnortonm.wordpress.com/2018/06/09/a-torre-do-jogo-da-pela/> (acedido em 15-03-2019)
- W4: <http://www.cm-lisboa.pt/equipamentos/equipamento/info/palacio-dos-condes-de-almadapalacio-da-independencia> (acedido em 19-03-2019)
- W5: <http://db-heritage.Inec.pt/> (acedido em 18-11-2018)

Anexos

Anexo A1 – Registo e características macroscópicas das amostras estudadas

Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas




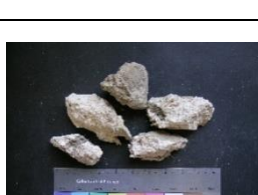


Localização	Identificação	Registo fotográfico	Descrição do tipo de amostra			Agregados							Cor da amostra	Coesão	Aspetos Particulares			Estado geral da amostra	
						Tipo				Forma					Cor	Nódulos de cal	Colonização biológica		Outros
			Reboco	Enchimento	Juntas	Siliciosos	Calcários	Fragmentos cerâmicos	Outros	Anguloso	Sub-rolado	Rolado							
Local de referência 1 Torre do Jogo da Péla	JP_T1		-	Núcleo de enchimento horizontal de parede da torre com 3 camadas: 2 de calcário margoso e 1 de argamassa de cal	-	•	•	•	Diâmetro: 74,6 mm Comprimento: 357,5 mm Dimensão do agregado maior: 39.4 mm	-	•	-	Calcários cremes, acinzentados, acastanhados e outros negros; Cerâmicos vermelhos	Creme/castanho e castanho claro	Média	•	-	-	Bom estado; alguma contaminação na parte superior dada a exposição exterior
	JP_T2		-	Núcleo de enchimento vertical da torre com 3 camadas: 2 de calcário margoso e 2 de argamassa de cal	-	•	•	•	Diâmetro: 74,5 mm Comprimento: 230,5 mm Dimensão do maior agregado: 70.2 mm	-	•	•	Castanho, castanho-escuro, acinzentado	Acastanhado/esbranquiçado	Média	•	-	presença fossilífera	Bom estado no geral; heterogeneidade entre camadas visível
	JP_T3		-	Núcleo de enchimento vertical da torre com 4 camadas: 2 de calcário margoso e 2 de argamassa de cal	-	•	•	•	Diâmetro: 74,4 mm Comprimento: 230,5 mm Dimensão do maior agregado: 38.7 mm	-	•	•	Cerâmicos negros avermelhados; Calcários cor variável: branco, castanho, creme e esverdeados	Creme/acastanhada e cinzento	Média	•	-	fragmentos de carvão e presença fossilífera	Bom estado no geral; heterogeneidade entre camadas visível; irregularidades na face mais exterior
	JP_T4		5 fragmentos de argamassa de cal	-	-	•	-	•	Agregados finos e mais rolados; alguns fragmentos de carvão e de cal	-	•	•	Creme e branco; preto para os agregados de carvão e avermelhado para os cerâmicos	Creme e cinzento-escuro	Fraca	•	-	fácil desagregação material	fraco estado por ter sido retirada mais à superfície
Local de referência 2 Edifício Calçada de Santana	CS_C		-	Núcleo de enchimento do cubelo com 2 pedaços de amostra retirada	-	•	•	•	Diâmetro: 74, 6 mm Comprimento: 140 mm Calcário mais acastanhado; possível agregado de basalto; conchas	•	•	•	Cremes, castanho-claro, avermelhado e preto	Creme/esbranquiçado	Média	•	-	-	bom estado mais no interior
Local de referência 3 Palácio da Independência	PI_M		-	5 fragmentos de enchimento da parede orientada a este	-	•	•	-	Diâmetro: Comprimento:	•	•	•	Cremes/esbranquiçados	Creme	Fraca	•	-	muitos nódulos de cal	fraco estado de conservação

Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas (continuação)






Localização	Identificação	Registo fotográfico	Descrição do tipo de amostra			Agregados								Cor da amostra	Coesão	Aspectos Particulares			Estado geral da amostra
						Tipo				Forma			Cor			Nódulos de cal	Colonização biológica	Outros	
			Reboco	Enchimento	Juntas	Siliciosos	Calcários	Fragmentos cerâmicos	Outros	Anguloso	Sub-rolado	Rolado							
Local de referência 4 Escola Básica e Secundária Gil Vicente	EGV_M1		-	enchimento da parede da muralha (nicho nível inferior) dividido em 2 pedaços de amostra	-	•	-	•	Diâmetro: 73,3 mm Comprimento: 230,18 mm dimensão do maior agregado: 47,91 mm	-	-	•	cremes e acinzentados; cerâmicos avermelhados (poucos)	Castanho-escuro maioritariamente	Baixa	•	-	fraca coesão superficial e fácil desagregação material	bom estado no geral; boa homogeneidade do material
	EGV_M2		-	enchimento da parede da muralha (nicho nível superior) dividido em 2 pedaços de amostra	-	•	-	-	Diâmetro: 74,08 mm Comprimento: 234,82 mm dimensão do maior agregado: 49,16 mm	-	-	•	cremes, acastanhados e cinzentos	Castanho-escuro maioritariamente	Baixa	•	-	fraca coesão superficial e fácil desagregação material	bom estado no geral; boa homogeneidade do material
	EGV_M3		-	7 fragmentos de enchimento da parede da muralha junta à base	-	•	-	-	presença mais relevante de agregados de cor preta	-	-	•	castanho claro e cremes	Creme	Baixa	•	-	fraca coesão superficial e fácil desagregação material	bom estado; possível contaminação e sujidade por estar exposta
	EGV_C1		-	-	argamassa de juntas do cubelo	•	-	-	presença de agregados mais escuros	-	-	•	cremes e brancos	Creme	Baixa	•	-	fraca coesão	bom estado; alguma sujidade e contaminação
	EGV_C2		-	núcleo de enchimento do cubelo com 1 única camada de material	-	-	•	•	-	-	-	•	-	cerâmicos avermelhados (poucos); calcários castanhos e cremes	Cinzentos-escuros	Baixa/média	-	-	alguns espaços abertos no interior

Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas (continuação)







Localização	Identificação	Registo fotográfico	Descrição do tipo de amostra			Agregados								Cor da amostra	Coesão	Aspectos Particulares			Estado geral da amostra
						Tipo				Forma			Cor			Nódulos de cal	Colonização biológicas	Outros	
			Reboco	Enchimento	Juntas	Siliciosos	Calcários	Fragmentos cerâmicos	Outros	Anguloso	Sub-rolado	Rolado							
Local de referência 5 Palácio da Rosa	PR_M1		-	Enchimento da muralha com uma única camada de calcário margoso	-	-	•	-	-	-	-	•	Castanho	Castanho	Elevada	-	-	muito compacto	bom estado
	PR_M2		-	-	7 fragmentos de argamassa de cal das paredes da cozinha	•	-	•	Carvão	-	-	•	Cremes e castanho; brancos; vermelhos; negros	Creme/esbranquiçado	Baixa	•	-	fraca coesão	estado médio; com possível contaminação; muito exposta
	PR_M3		-	-	8 fragmentos de argamassa de cal das paredes do túnel escavado na muralha	•	•	-	Vestígios de concha	-	-	•	Cremes e brancos	Creme/esbranquiçado	Média	•	-	presença fossilífera (conchas)	bom estado
	PR_M4		-	-	7 fragmentos de argamassa de cal das paredes do exterior da muralha	•	•	-	Grande quantidade de areia siliciosa e nódulos de carvão	-	-	•	Cremes e brancos	Creme/esbranquiçado	Média	•	•	muitos nódulos de cal	estado médio; com alguma colonização superficial
	PR_M5		-	-	5 fragmentos de argamassa de cal das paredes interiores (nicho junto à cozinha)	•	•	-	Grande quantidade de areia siliciosa; agregados de calco-arenito; presença de quartzo (brilho)	-	-	•	Castanhos; cremes e negros	Creme	Média	•	-	alguns nódulos de cal	bom estado
	PR_M6		-	-	6 fragmentos de argamassa de cal da muralha exterior (onde se extraiu a amostra PR_M1)	•	-	-	Presença de agregados fossilíferos e de carvão	-	-	•	Castanhos escuro e pretos	Castanho	Média	•	-	-	estado médio; muita exposição exterior

Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas (continuação)














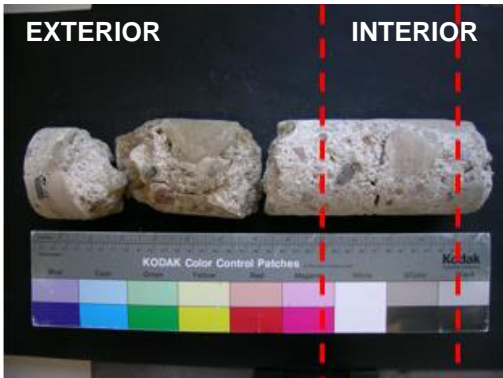
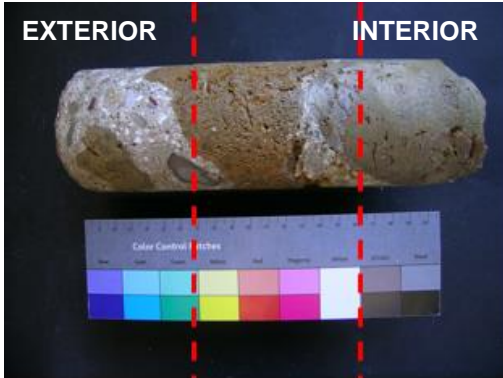
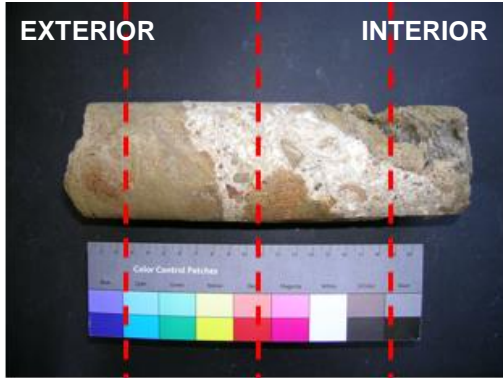

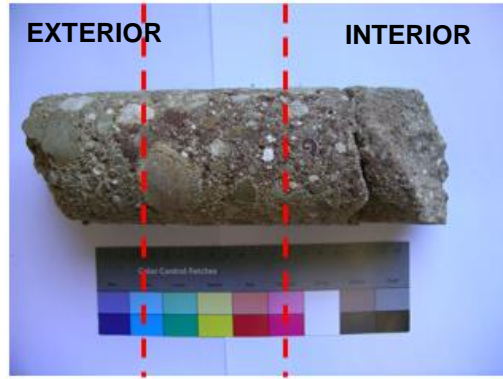
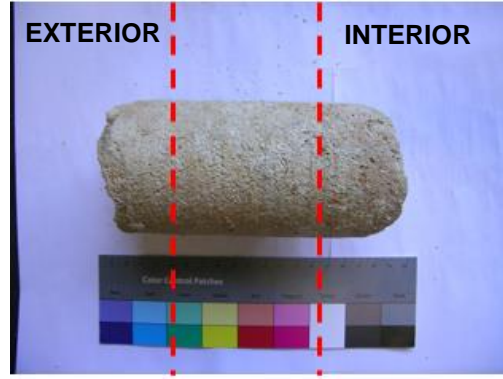
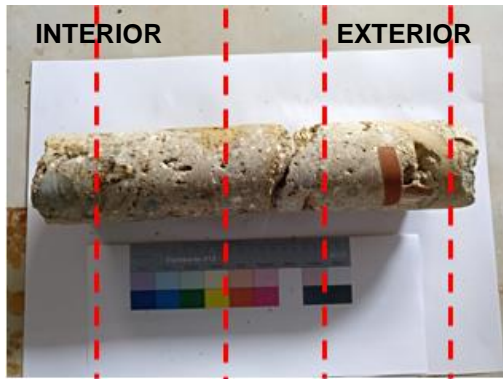
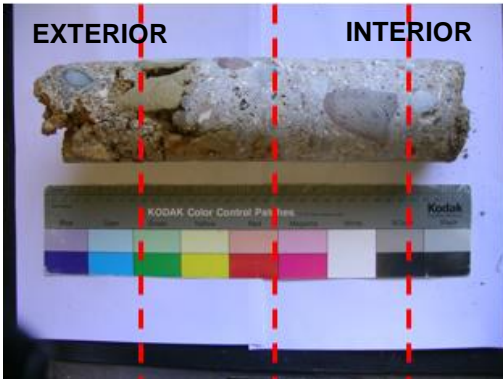
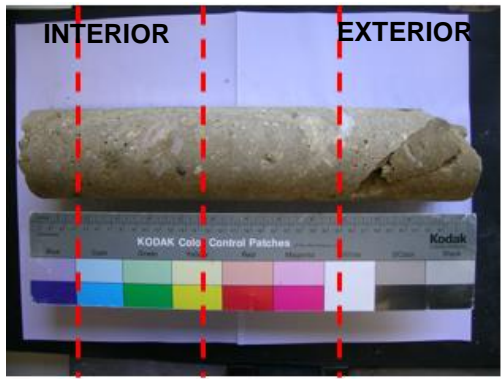
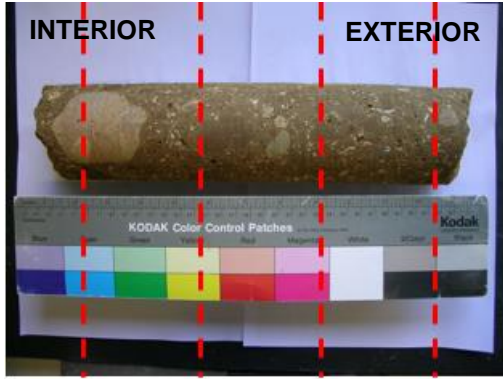
Localização	Identificação	Registo fotográfico	Descrição do tipo de amostra			Agregados								Cor da amostra	Coesão	Aspectos Particulares			Estado geral da amostra
						Tipo				Forma			Cor			Nódulos de cal	Colonização biológicas	Outros	
			Reboco	Enchimento	Juntas	Siliciosos	Calcários	Fragmentos cerâmicos	Outros	Anguloso	Sub-rolado	Rolado							
Local de referência 6 Corpo Santo Hotel	CSH_T1		-	Enchimento do núcleo da torre com uma camada de argamassa de cal	-	•	•	-	Diâmetro: 68,50 mm Comprimento: 147,25 mm Grande quantidade de areia siliciosa	-	•	•	Cremes e brancos	Creme	Média	•	-	-	bom estado geral
	CSH_T2		-	Enchimento do núcleo da torre com 2 camadas de material: uma camada de argamassa de cal outra de calcário	-	•	•	-	Diâmetro: 72,99 mm Comprimento: 164,43 mm Grande quantidade de areia siliciosa com quartzo; calcários grossos	-	•	•	Cremes e brancos	Creme escuro e acinzentada	Elevada	•	-	-	bom estado geral
Local de referência 7 Condomínio dos Terraços de Bragança	TB_T1		-	Enchimento da torre com 2 camadas de material diferente (calcário e argamassas) dividido em 2 pedaços de amostra	-	•	•	•	Diâmetro: 74,35 mm Comprimento: 357,5 mm Dimensão do maior agregado: 48,67 mm	•	•	-	Branco, cremes, esverdeados e avermelhado	Branco/acinzentado	Elevada	•	-	elementos castanhos e vermelhos com fraca consistência	bom estado geral
	TB_T2		-	Enchimento da torre com 4 camadas de material diferente (2 de calcário margoso e 2 de argamassa)	-	•	•	•	Diâmetro: 72,61 mm Comprimento: 293 mm Agregados sub-angulosos e média dimensão; dimensão do maior agregado: 52,77 mm	•	•	-	Branco, cremes, esverdeados, avermelhado e pretos	Vermelhos, pretos, branco cremes e cinzentos	Média	•	-	desgaste do vermelho cerâmico (aparecimento do cerne do material)	bom estado geral; a face mais exterior está mais degradada
	TB_T3		-	Fragmento de enchimento da torre, junto à base de fundação (alçado Oeste)	-	•	•	-	-	-	•	-	Cremes e castanhos	Creme-escuro	Baixa	•	•	presença biológica	mau estado; muito exposta e provável contaminação
	TB_T4		-	Fragmento de enchimento da torre, junto à base de fundação (alçado Sul)	-	•	•	-	Areia siliciosa com quartzo e agregados grossos	-	•	•	Castanhos	Creme/acastanhado	Média	•	-	-	estado médio geral

Tabela A 1 - Registo e características macroscópicas das amostras estudadas (continuação)

Localização	Identificação	Registo fotográfico	Descrição do tipo de amostra			Agregados								Cor da amostra	Coesão	Aspectos Particulares			Estado geral da amostra
						Tipo				Forma			Cor			Nódulos de cal	Colonização biológicas	Outros	
			Reboco	Enchimento	Juntas	Siliciosos	Calcários	Fragmentos cerâmicos	Outros	Anguloso	Sub-rolado	Rolado							
Local de referência 7 Condomínio dos Terraços de Bragança	TB_M1		-	Enchimento do troço da muralha virada a Sul em taipa constituída por 3 pedaços (retirada do nível inferior)	-	•	•	•	Diâmetro: 72,67 mm Comprimento: 340 mm Poucos agregados grossos; dimensão do maior agregado: 41,86 mm	•	•	-	Cremes/esbranquiçados e castanhos	Castanho-claro	Elevada	•	-	-	bom estado geral
	TB_M2		-	Enchimento do troço da muralha virada a Sul em taipa constituída por 1 pedaço (retirada do nível superior)	-	•	•	•	Diâmetro: 72,38 mm Comprimento: 335 mm Poucos agregados grossos e cerâmicos; dimensão do maior agregado: 66,64 mm	•	•	-	Cremes/esbranquiçados e castanhos	Castanho-claro	Elevada	•	-	-	bom estado geral
	TB_M3		-	5 fragmentos do enchimento do troço da muralha virada a Sul em taipa junto à base	-	•	-	-	Agregados finos	•	•	-	Castanho-claro e cremes	Castanho-claro	Média/bai	•	-	-	estado médio geral
Local de referência 8 Rua Teixeira Trigo	RTT_T		-	4 fragmentos de argamassa de enchimento das paredes de uma torre	-	•	•	•	-	•	•	•	Cinzentos, cremes e castanhos	Cinzeno	Média/baixa	-	-	-	estado médio geral
	RTT_P		-	-	3 fragmentos de argamassa de juntas de um postigo da muralha	•	•	-	-	•	•	•	Castanhos e cremes	Creme/cinzeno- claro	Média/baixa	-	-	-	estado médio geral
	RTT_M		-	6 fragmentos de argamassa de enchimentos das paredes principais da muralha	-	•	•	-	-	•	•	•	Castanhos, cremes e cinzeno escuros	Castanho-claro/creme	Média/baixa	-	-	-	estado médio geral
Local de referência 9 Largo da Graça	LG_M		-	Blocos de taipa de enchimento da muralha junto à base	-	•	-	-	-	•	•	-	Cremes e castanhos	Creme/castanho-claro	Média	•	-	-	estado médio geral

Notação: (-) não verificado e/ou sem evidência (•) verificado

Tabela A 2 – Marcação das carotes com identificação dos provetes para ensaio (linhas tracejadas)

Amostras extraídas por carotagem			
JP_T1	JP_T2	JP_T3	
			
Amostras extraídas por carotagem			
EGV_M1	EGV_M2	CHS_T1	
			
Amostras extraídas por carotagem			
TB_T1	TB_T2	TB_M1	TB_M2
			

Notação: (-----) Zona de corte efetuado em cada carote

Anexo A2 – Resultados detalhados da caracterização *in situ*

Resistência superficial pelo esclerómetro pendular

Tabela A 3 – Resultados, em graus Vickers, da resistência superficial por esclerómetro pendular para o caso de estudo 1 – Torre jogo da Péla

Local de referência 1 - Torre do Jogo da Péla								
Nascente			Poente			Norte		
0,70 m da base	1,70 m da base	2,40 m da base	0,70 m da base	1,70 m da base	2,40 m da base	0,70 m da base	1,70 m da base	2,40 m da base
61	65	72	42	48	70	59	84	54
82	76	90	65	50	78	30	84	51
85	71	93	70	40	78	44	83	50
71	92	50	90	50	63	66	91	41
	89	60	80	58		36	65	
	78	62	95	60				
	86	53	78	72				
	83		56	74				
	70		71	68				
			82	63				
			78					
			68					

Tabela A 4 - Resultados, em Vickers, da resistência superficial pelo esclerómetro superficial para caso de estudo 3 – Palácio da Independência

Local de referência 3 - Palácio da Independência				
Sul				
Encasque e reboco muito irregular	Nível superior	Argamassa de enchimento cinza (muito exposta)	Argamassa de encasque rosa	Reboco de recorte na escada
39	97	30	32	59
31	35	28	39	50
31	92	28	37	46
39	89	34	38	48
31	67	22	48	70
39	60	37	53	26
35		27	54	
36		38		
		58		
		27		

Tabela A 5 - Resultados, em Vickers, da resistência superficial pelo esclerômetro superficial caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança

Local de referência 7 - Condomínio dos Terraços de Bragança				
Nascente		Sul		
Base da muralha original	Réplica	Base da muralha original	Nível superior	Reboco
34	44	63	56	46
41	61	83	32	61
74	41		79	59
51	52		86	56
41	43		101	53
25	70		75	53
41	67		103	69
77	32		43	56
66	63		62	49
73	45		101	
38	43		96	
86	63		31	
48	67		45	
68	57			
47	53			
48	47			
29	55			
81	67			
80	56			
49	41			
29	48			
81	70			
40	49			
70	51			
49	81			
60	69			
63	42			
59	66			
67	61			
77	48			
53	61			
40	59			
	66			
	65			
	56			
	39			
	66			
	77			
	58			

Resistência superficial pelo *Martinet-Baronnie* (choque de esfera)

Tabela A 6 - Resultados, em mm, do diâmetro da concavidade da esfera no caso de estudo 1 – Torre do Jogo da Péla

Local de referência 1 - Torre do Jogo da Péla					
Nascente		Poente		Norte	
0.70 m da base	1.70 m da base	0.70 m da base	1.70 m da base	0.70 m da base	1.70 m da base
9.98	13.38	12.16	13.69	12.94	12.02
9.42	13.63	12.59	14.1	13.02	10.81
13.55	9.26	10.35	13.03	12.26	9.02
9.81	10.13	11.44	13.36		
10.47	11.7	9.11	9.37		
		9.85	13.74		
			13.76		

Tabela A 7 - Resultados, em mm, do diâmetro da concavidade da esfera no caso de estudo 7 – Terraços de Bragança

Local de referência 7 - Condomínio dos Terraços de Bragança	
Nascente (réplica da muralha)	
0.20 m da base	0.60 m da base
14.77	13.9
16.48	14.19
16.63	15.9
14.24	14.64
14.16	12.04
12.91	12.86
13.04	13.38
14.6	13.8

Absorção de água sob baixa pressão por tubos de *Karsten*

Tabela A 8 – Resultados da quantidade de água absorvida no instante de tempo *i* para o caso de estudo 3 – Palácio da Independência

Local de referência 3 - Palácio da Independência								
Zona	Wi - absorção de água no instante <i>i</i> [ml/cm ²]							
	Tempo [min]	0	5	10	15	20	25	30
	Tubo							
Pedra	1	0	0.08	0.10	0.12	0.14	0.14	0.16
	2	0	0.23	0.31	0.40	0.45	0.49	0.55
	3	0	0.20	0.22	0.24	0.27	0.28	0.30
	média	0	0.17	0.21	0.26	0.29	0.30	0.34
Argamassa cinza	1	0	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
	2	0	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.10
	3	0	0.08	0.16	0.18	0.22	0.24	0.27
	4	0	0.37	0.45	0.53	0.59	0.67	0.73
	média	0	0.25	0.29	0.32	0.35	0.38	0.40
Argamassa rosa	1	0	0.08	0.12	0.14	0.16	0.20	0.20
	2	0	0.22	0.31	0.37	0.41	0.47	0.51
	3	0	0.10	0.16	0.20	0.22	0.24	0.27
	média	0	0.14	0.20	0.24	0.27	0.31	0.33
Tijolo de encasque	1	0	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
	2	0	0.12	0.18	0.22	0.27	0.31	0.35
	média	0	0.06	0.09	0.11	0.14	0.16	0.18

Tabela A 9 - Resultados da quantidade de água absorvida no instante de tempo *i* para o caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança

Local de referência 7 - Condomínio Terraços de Bragança												
Zona	Tempo [min]	Wi - absorção de água no instante <i>i</i> [ml/cm ²]										
		0	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
	Tubo											
Muralha protegida a Sul	1	0	0.20	0.35	0.43	0.49	0.55	0.82				
	2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06		
	3	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
	média	0	0.04	0.07	0.09	0.10	0.11	0.18	0.03	0.04	0.03	0.04
Muralha réplica Norte	1	0	0.06	0.10	0.16	0.20	0.20	0.31	0.41	0.45	0.51	0.59
	2	0	0.10	0.16	0.20	0.24	0.29	0.41	0.55	0.61	0.69	0.78
	3	0	0.31	0.55	0.71	0.82						
	média	0	0.16	0.27	0.36	0.42	0.24	0.36	0.48	0.53	0.60	0.68

Velocidade de propagação de ultrassons (método indireto)

Tabela A 10 – Resultados, em m/s, da velocidade de propagação por ultrassons no caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança

Local de referência 7 - Condomínio dos Terraços de Bragança					
Réplica da muralha			Muralha original		
10	15	20	10	15	20
100.7	133.5	157.4	68.9	78.2	100.1
98.5	132.7	158.3	67.4	74.4	98.7
103.9	132.4	157.4	65.7	80.3	98.8
83.3	107.6	129.9			
82	106.8	129.4			
84	106.3	128.8			
85.9	140.5	175.8			
87.8	142.5	176.2			
89.5	143	176			
32.9	66.2	80.1			
38.9	66.9	80.6			
39.8	64.4	80.3			
71.6	72.3	126.3			
69.3	70.2	128.2			
71.5	76.4	132.3			

	Réplica da muralha	Muralha original
média	104.85	81.39
desvio padrão	37.75	14.19
velocidade (m/s)	524.26	406.94

Anexo A3 – Caracterização individual dos provetes dos diversos casos de estudo

Caso de estudo 1 – Torre do Jogo da Péla

Amostra JP_T1 – Ensaio físico-mecânicos, químicos e mineralógicos



Figura A 1 - Amostra JP_T1 com fragmentos JP_T1.1, JP_T1.2 e JP_T1.3 (a); vista lateral do fragmento JP_T1.2 (b) e face no provete JP_T1.3-1 em contacto com a água (c)

Provete: JP_T1.2

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

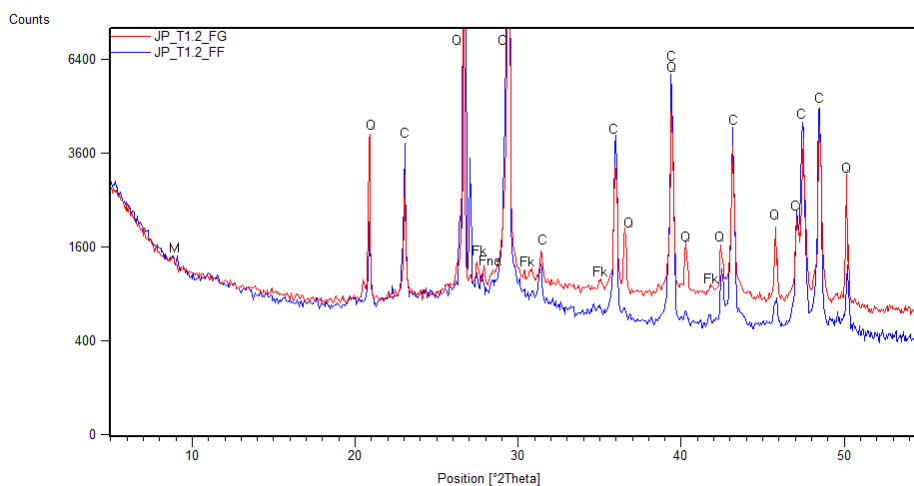


Figura A 2 – Difractograma para o provete JP_T1.2

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; Fk e Fna – Feldspatos potássico e sódico, respetivamente; C – Calcite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

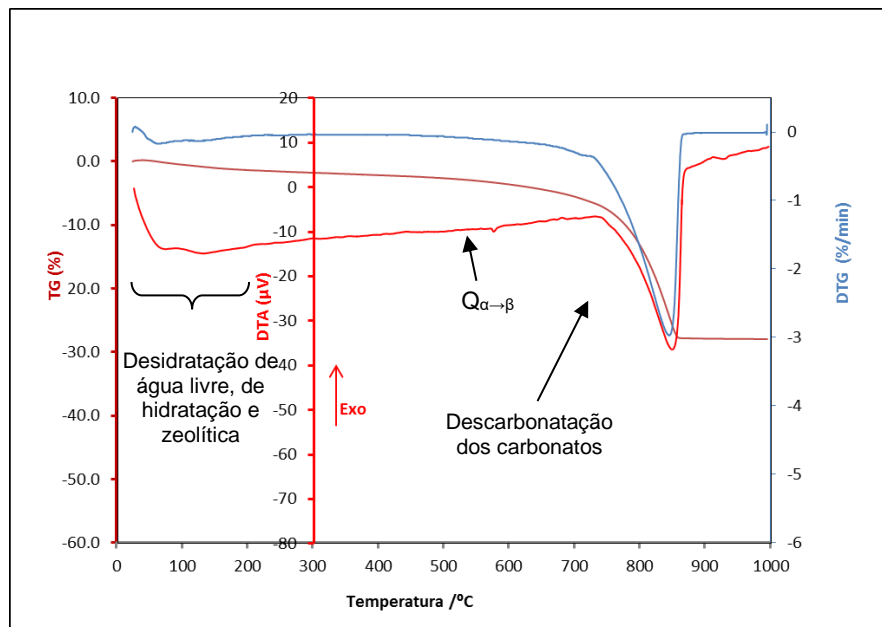


Figura A 3 – Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T1.2

Resultados: ensaio de análise granulométrica

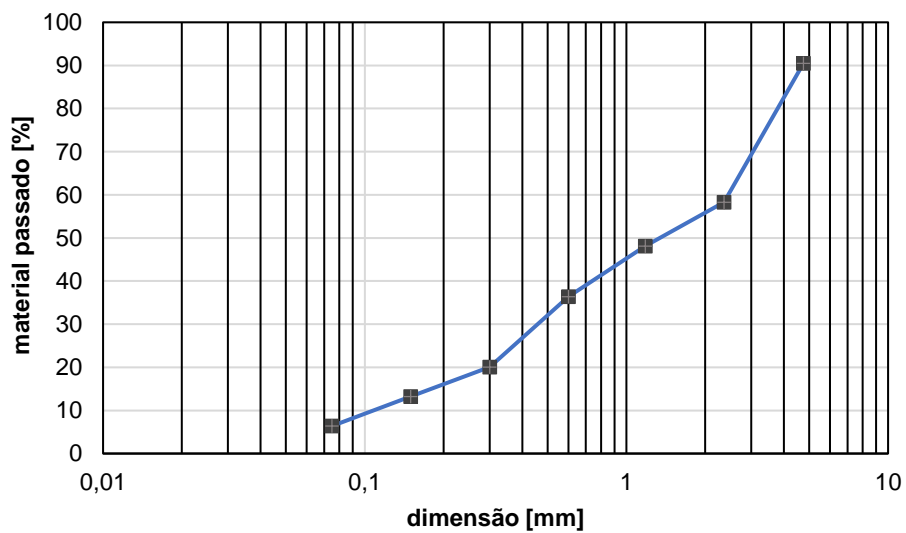


Figura A 4 – Curva granulométrica do provete JP_T1.2

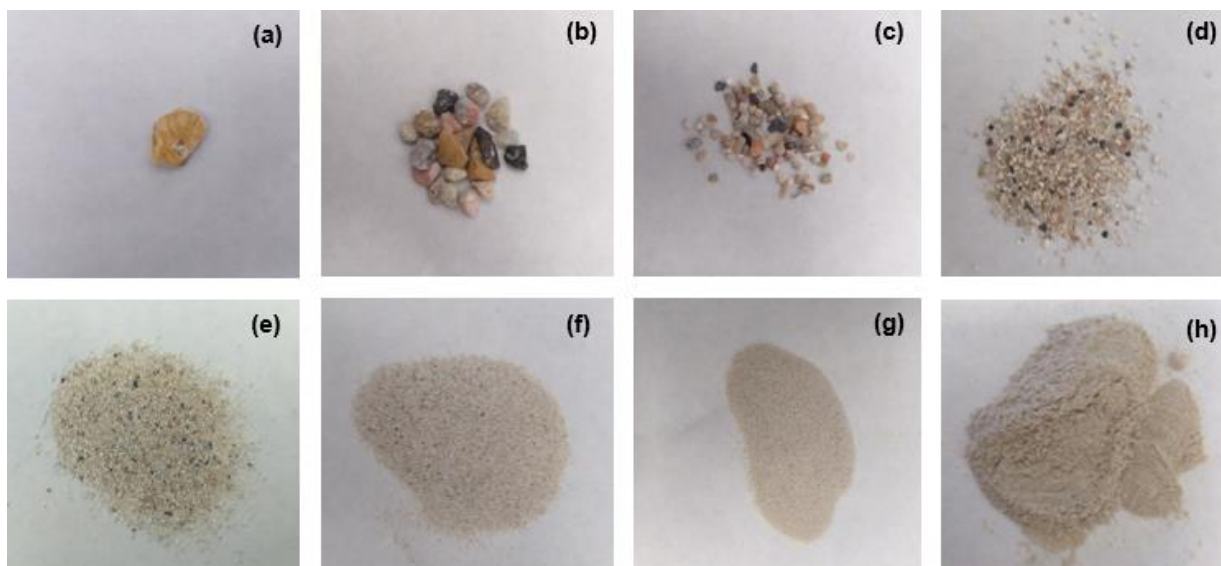
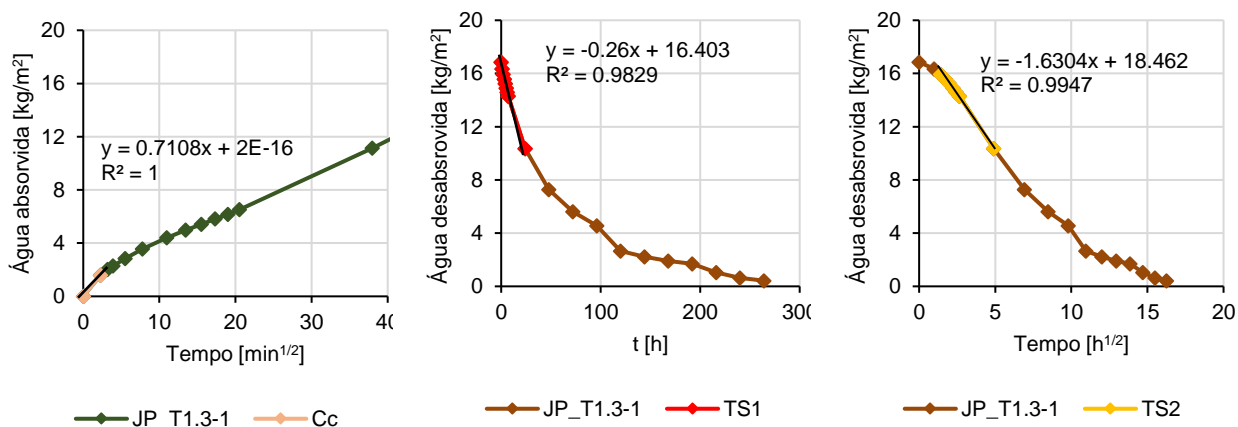


Figura A 5 – Análise granulométrica provete JP_T1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Provete: JP_T1.3

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: JP_T1.3 - 0.004403 m²



Provete: JP_T1.3

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

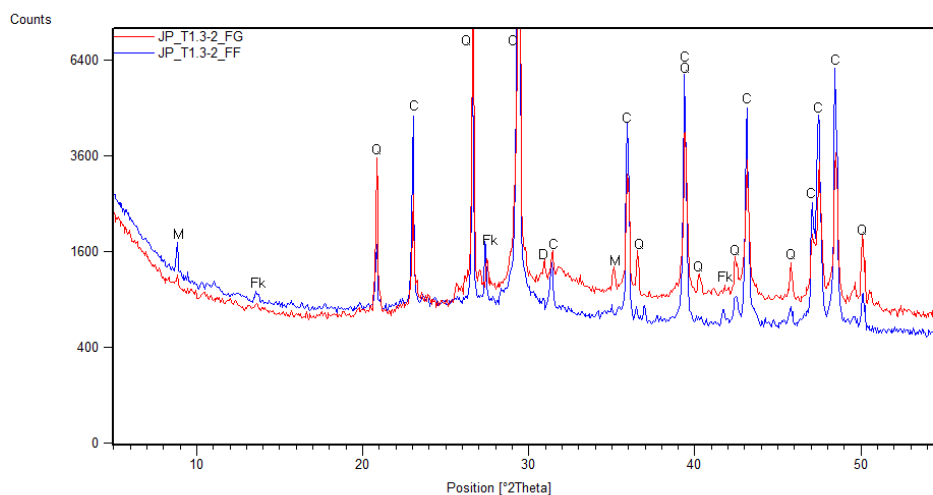


Figura A 6 - Difractograma para o provete JP_T1.3

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; Fk – Feldspato potássico; C – Calcite; Q – Quartz; D – Dolomite

ATG/dTG/ATD

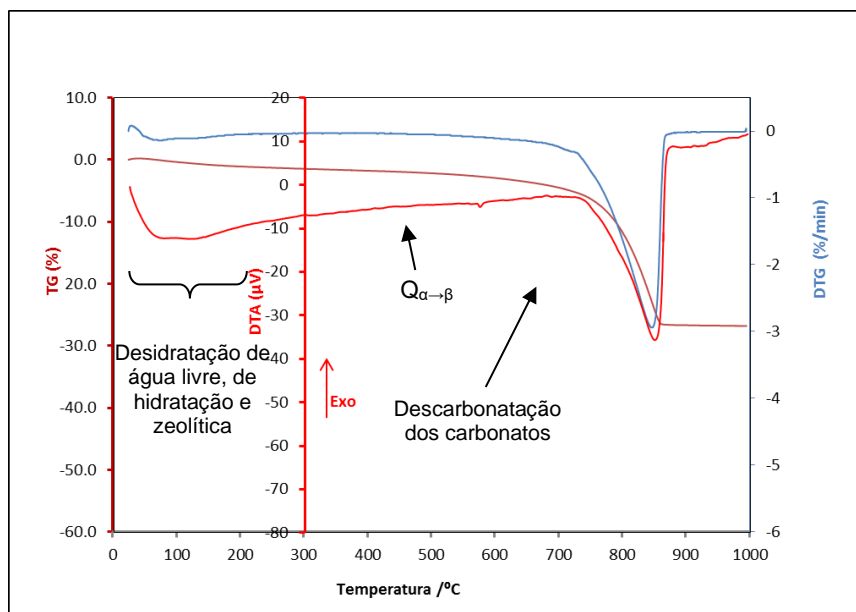


Figura A 7 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T1.3

Resultados: ensaio de análise granulométrica

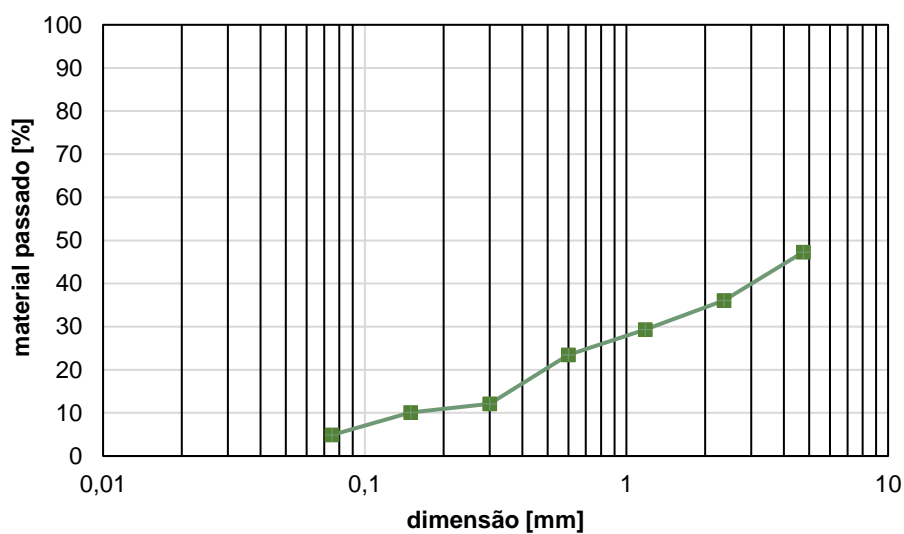


Figura A 8 – Curva granulométrica do provete JP_T1.3

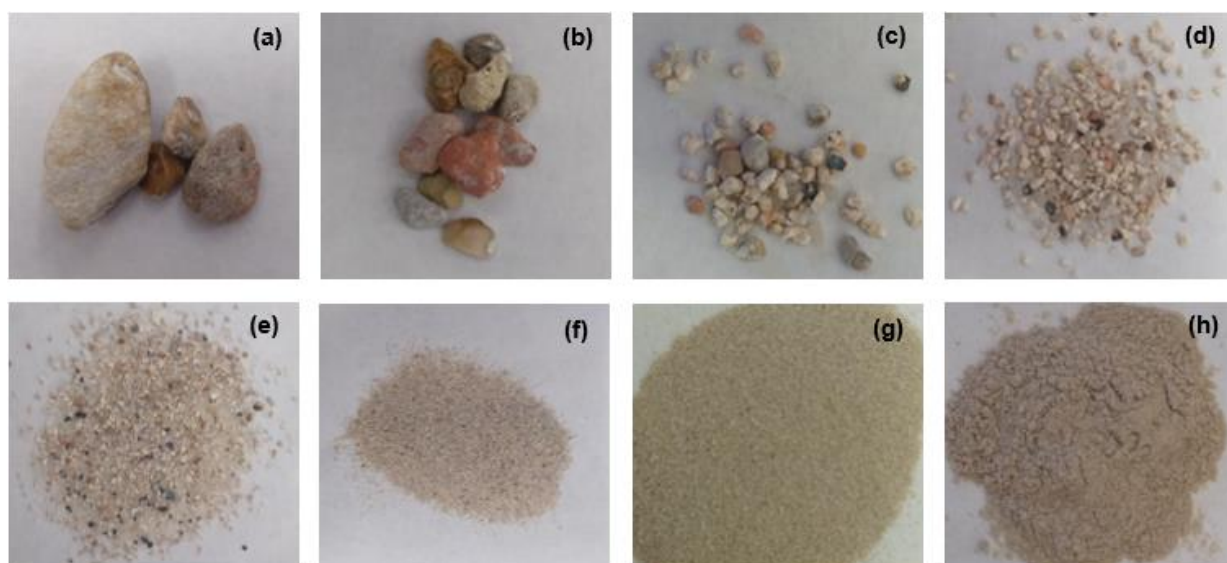


Figura A 9 - Análise granulométrica provete JP_T1.3-2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Amostra JP_T2 – Ensaios físico-mecânicos, químicos e mineralógicos

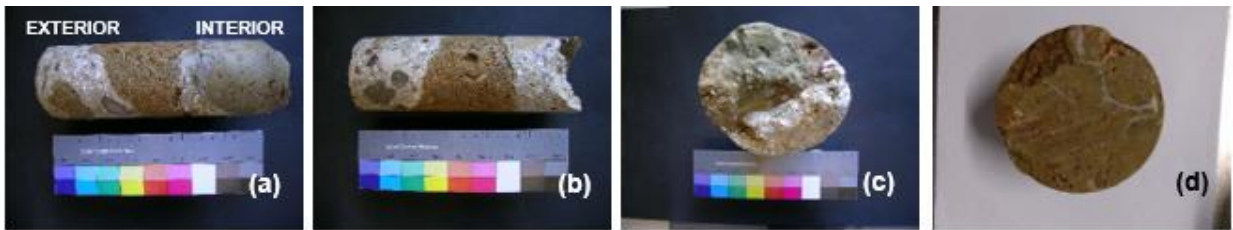
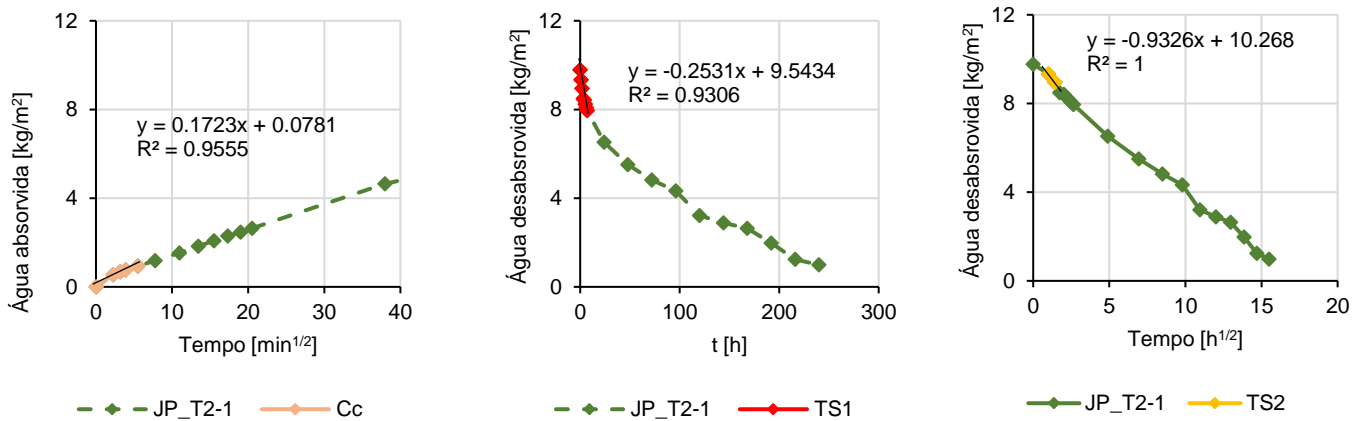


Figura A 10 - Amostra JP_T2 (a) vistas laterais (b e c) e face do provete JP_T2.1 em contacto com a água (d)

Provete: JP_T2.1

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: JP_T2.1 - 0.004367m²



Amostra JP_T3 – Ensaios físico-mecânicos, químicos e mineralógicos

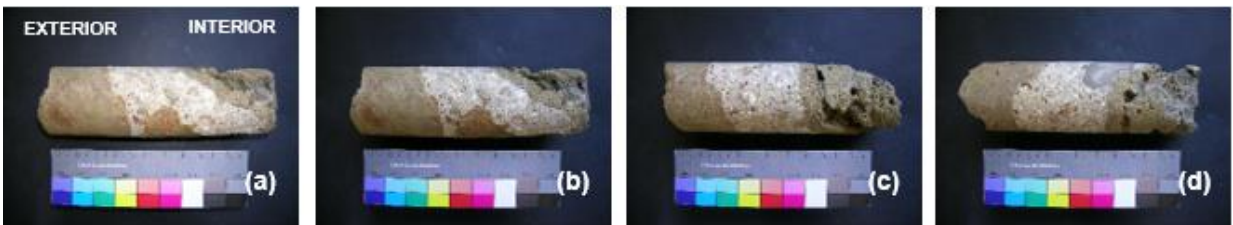


Figura A 11 – Amostra JP_T3 (a) vistas laterais (b, c e d)

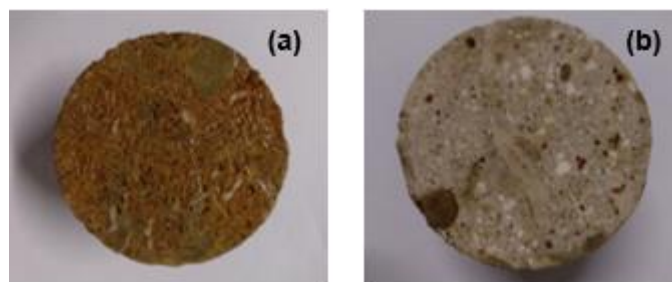
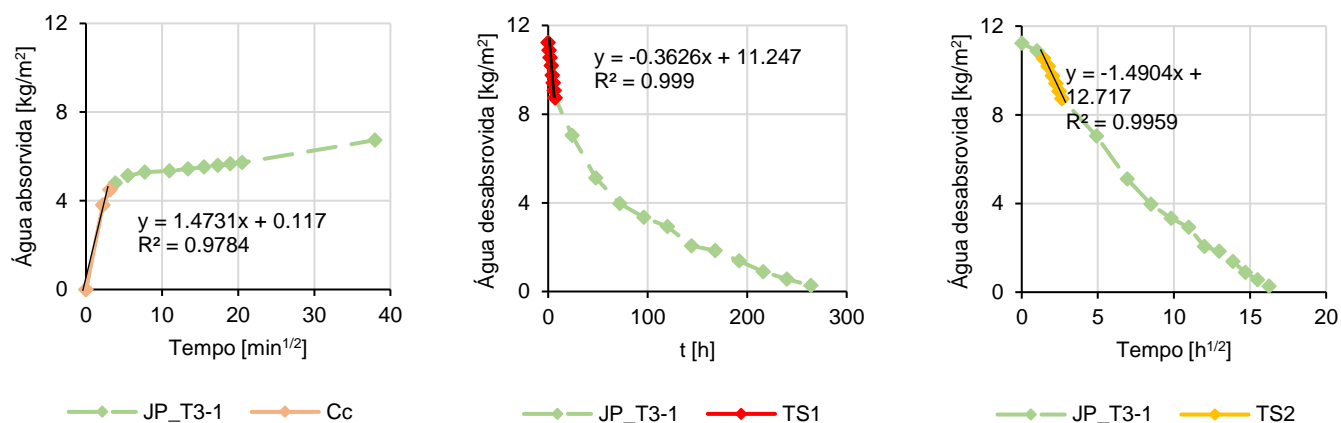


Figura A 12 – Face do provete JP_T3.1 em contacto com a água (a) e face do provete JP_T3.2 em contacto com a água

Provete: JP_T3.1

Resultados: Capilaridade e secagem

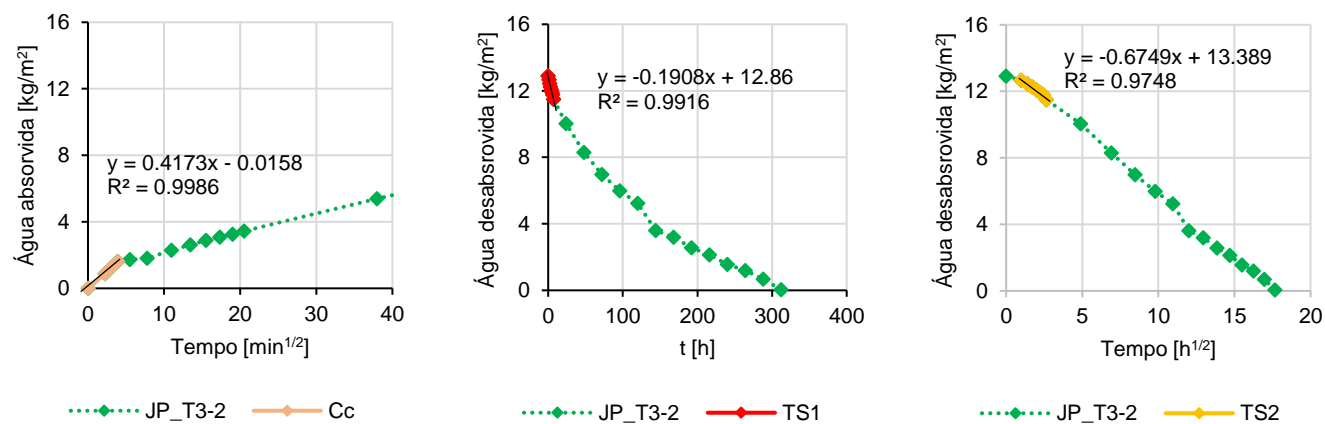
Superfície do provete: JP_T3.1 - 0.004361 m²



Provete: JP_T3.2

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: JP_T3.2 - 0.004360 m²



Provete: JP_T3.3

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

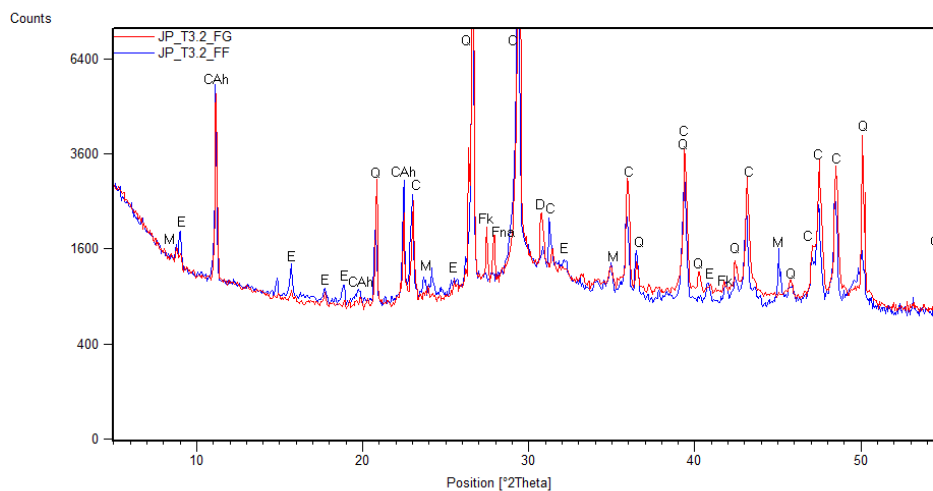


Figura A 13 - Difratograma para o provete JP_T3.3

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; E – Etringite; CAh – Aluminato de cálcio hidratado; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respectivamente; C – Calcite; D – Dolomite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

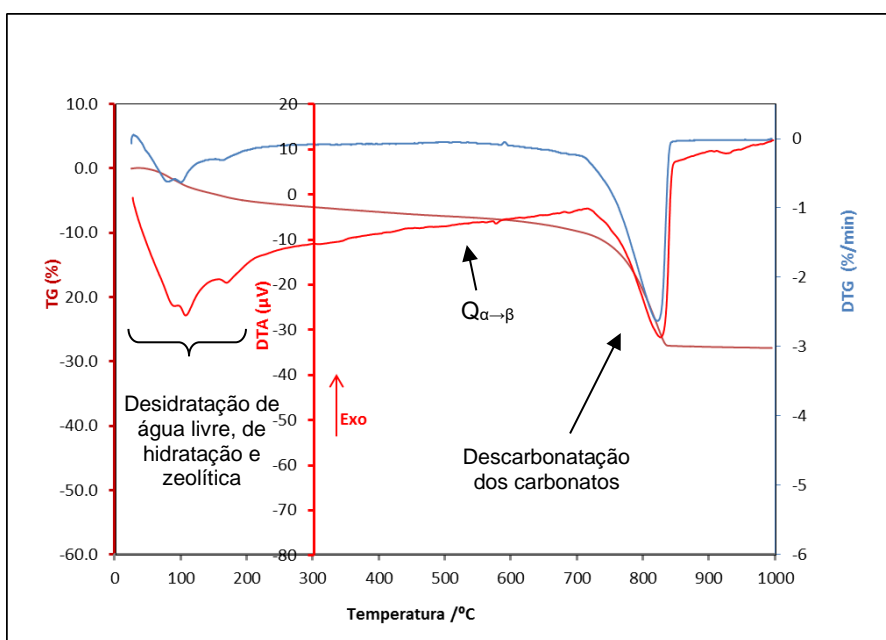


Figura A 14 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T3.3

Resultados: ensaio de análise granulométrica

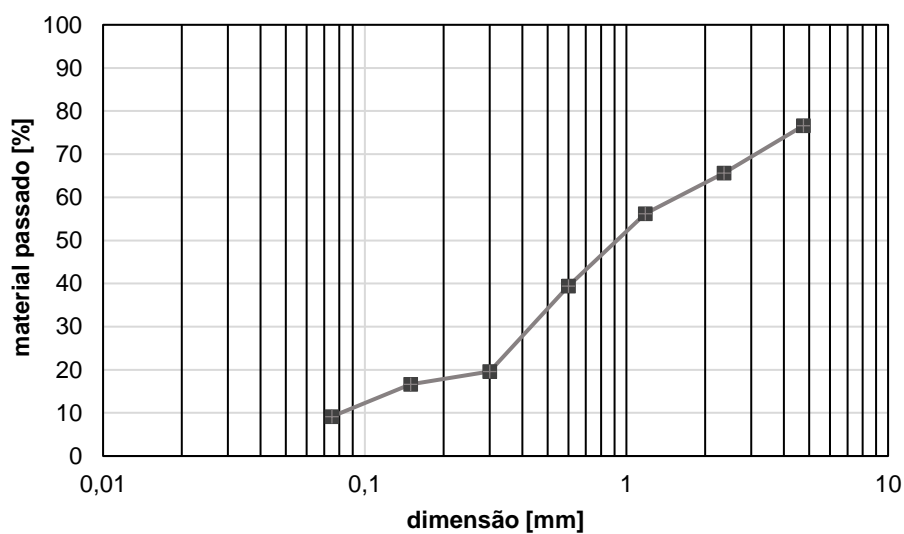


Figura A 15 – Curva granulométrica do provete JP_T3.3

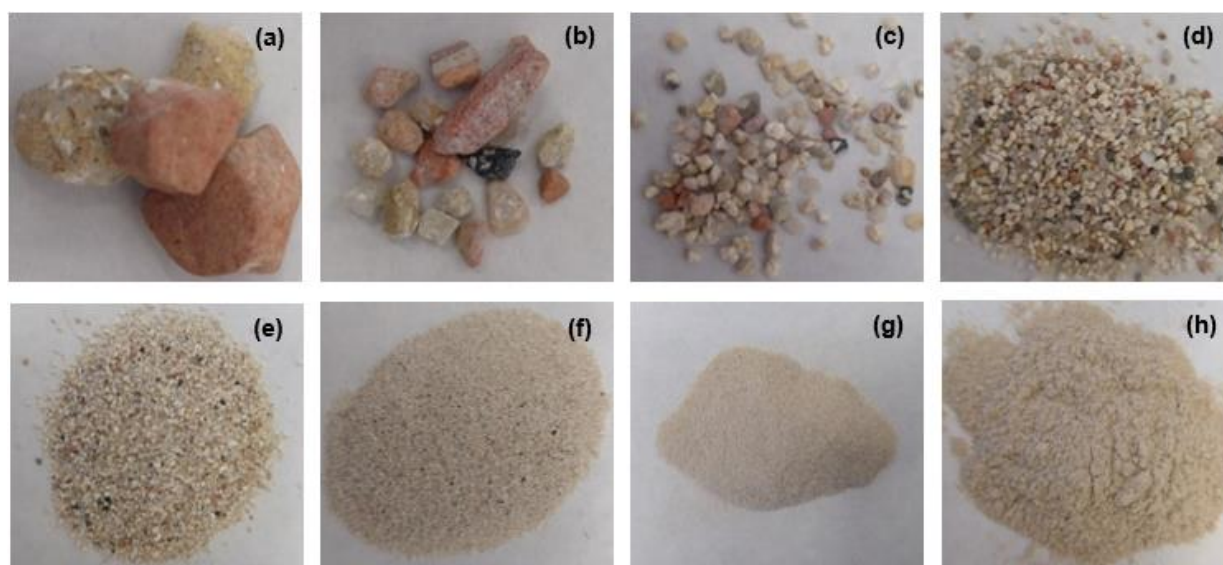


Figura A 16 - Análise granulométrica provete JP_T3.3: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Amostra JP_T4 – Ensaios químicos e mineralógicos



Figura A 17 – Amostra selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

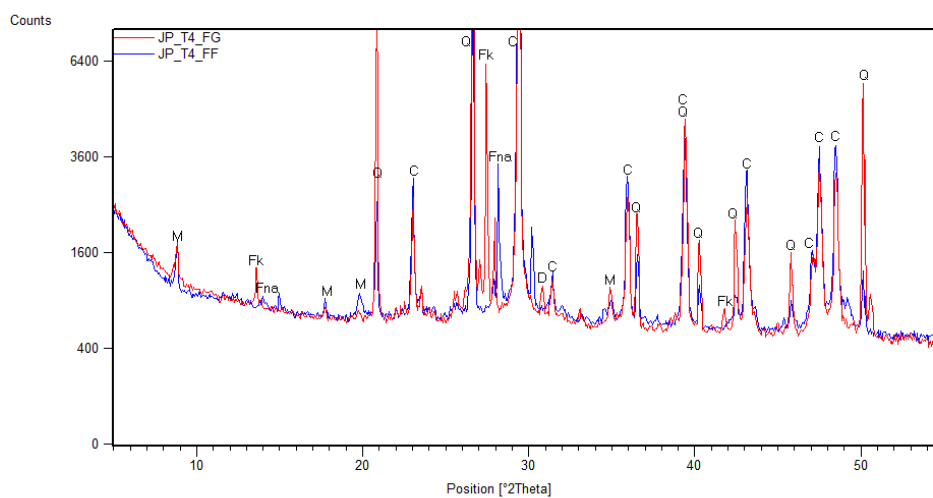


Figura A 18 - Difratoograma para o provete JP_T4

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; C – Calcite; Q – Quartzó; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente.

ATG/dTG/ATD

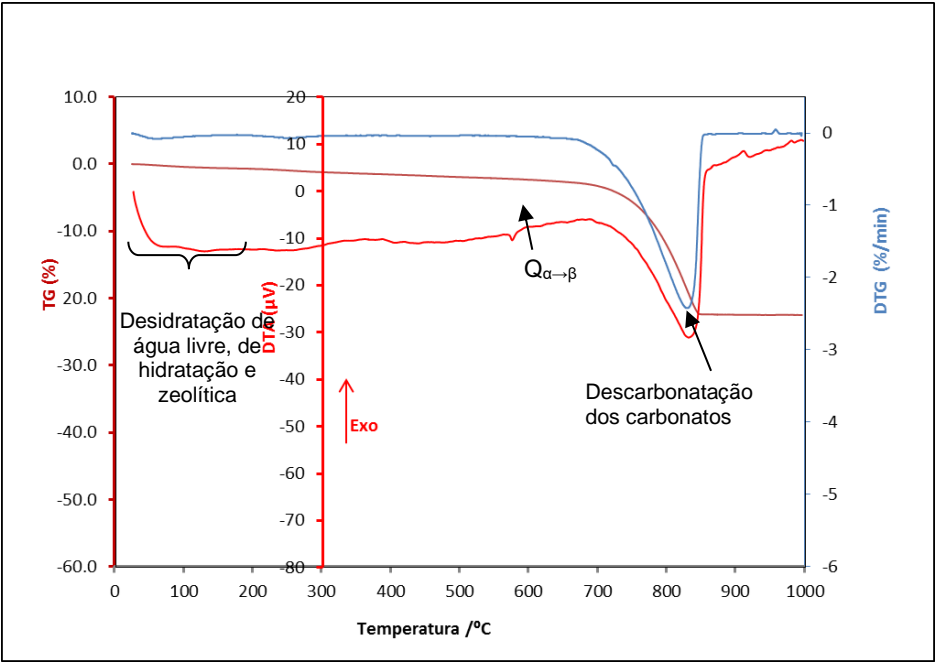


Figura A 19 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete JP_T4

Resultados: ensaio de análise granulométrica

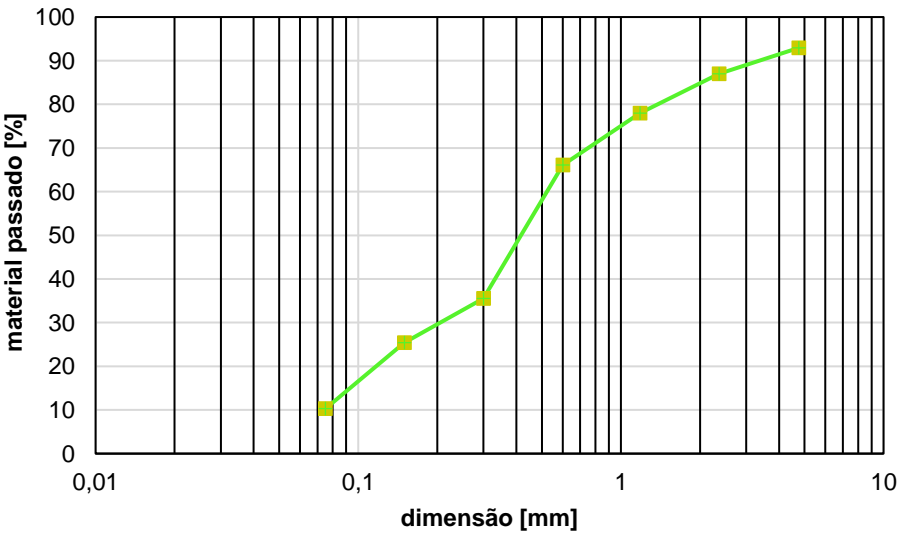


Figura A 20 – Curva granulométrica do provete JP_T4

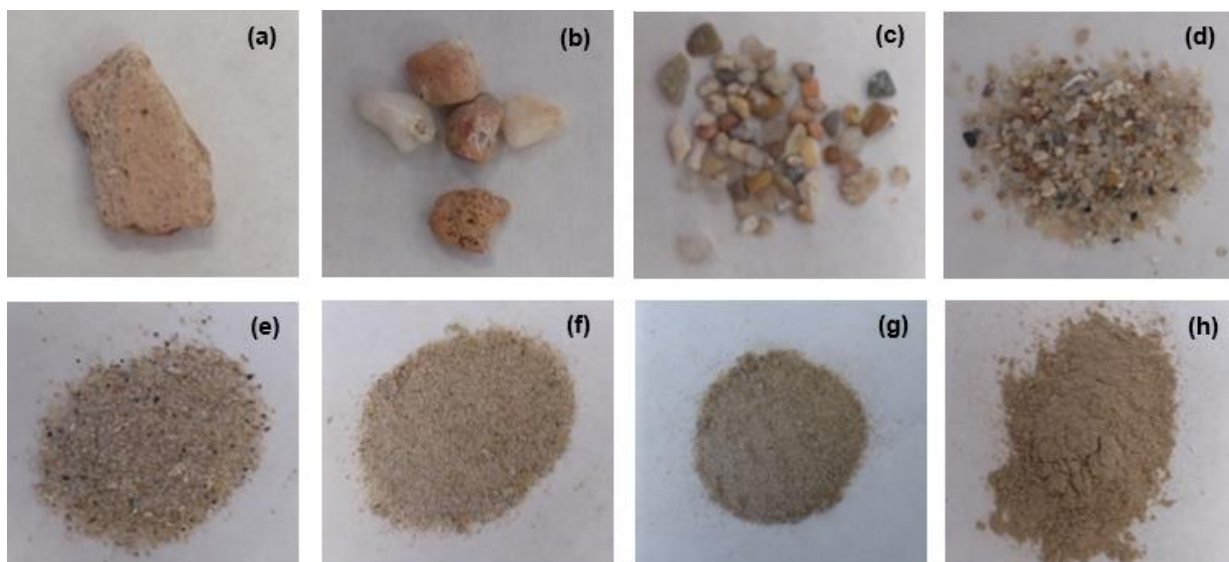


Figura A 21 - Análise granulométrica provete JP_T4: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 μm ; (e) fração 300 μm ; (f) fração 150 μm ; (g) fração 75 μm ; (h) fração < 75 μm

Caso de estudo 2 – Edifício da Calçada de Santana 137

Amostra CS_C – Ensaio químicos e mineralógicos

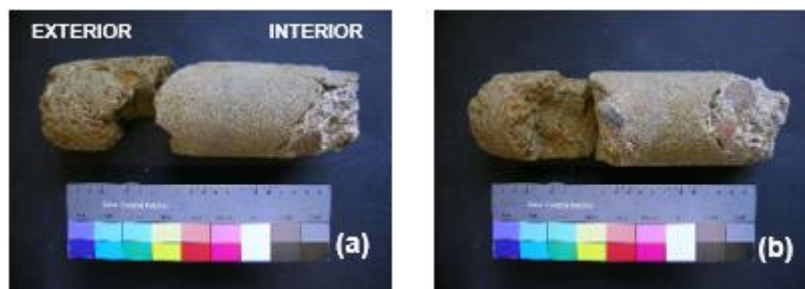


Figura A 22 - Amostra CS_C de vistas laterais selecionada para ensaios químicos e mineralógicos (a e b)

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

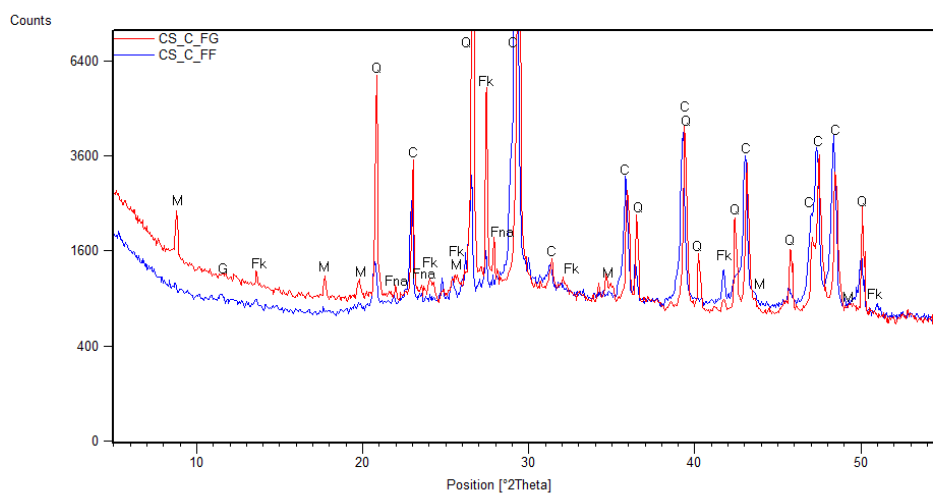


Figura A 23 - Difrátograma para o provete CS_C

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico; C – Calcite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

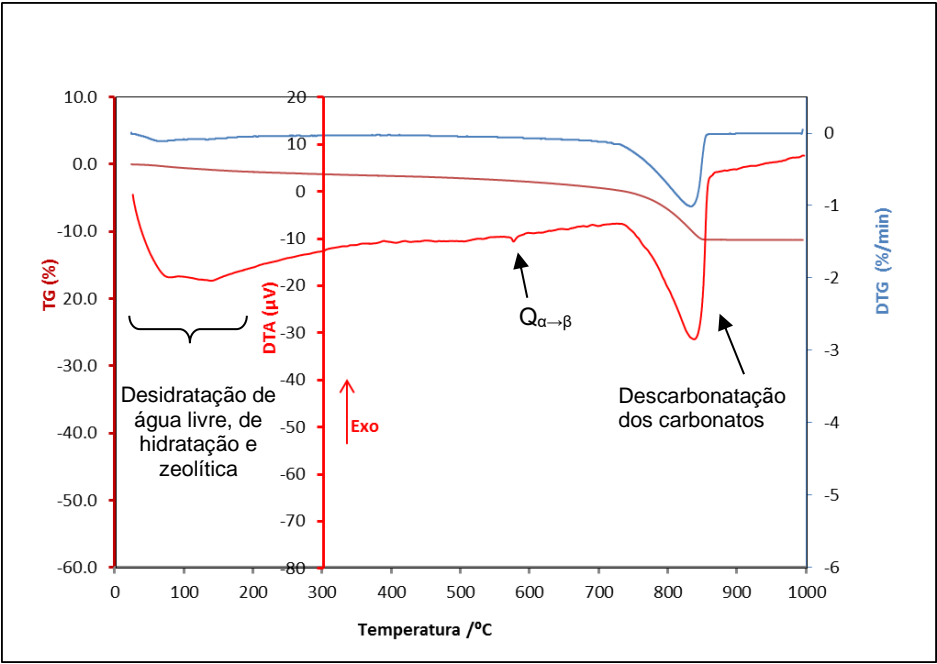


Figura A 24 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete CS_C

Resultados: ensaio de análise granulométrica

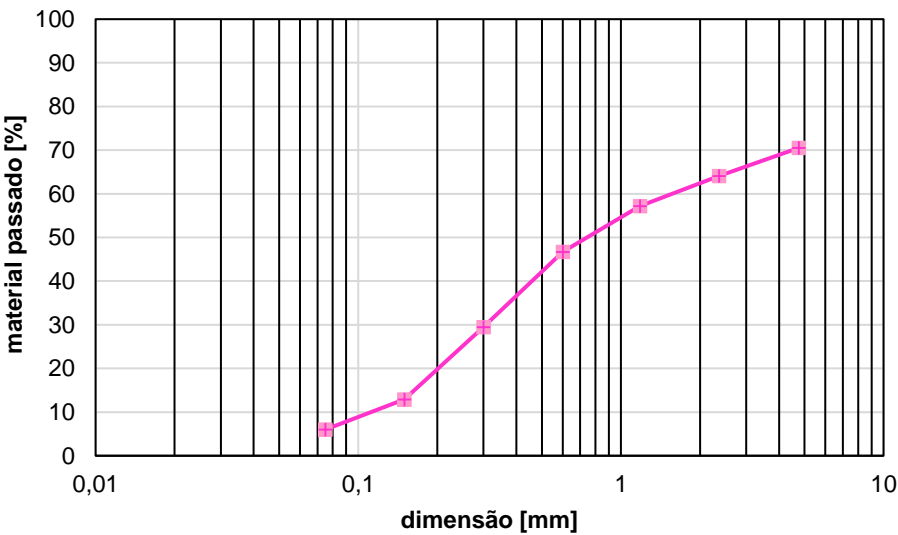


Figura A 25 - Curva granulométrica do provete CS_C

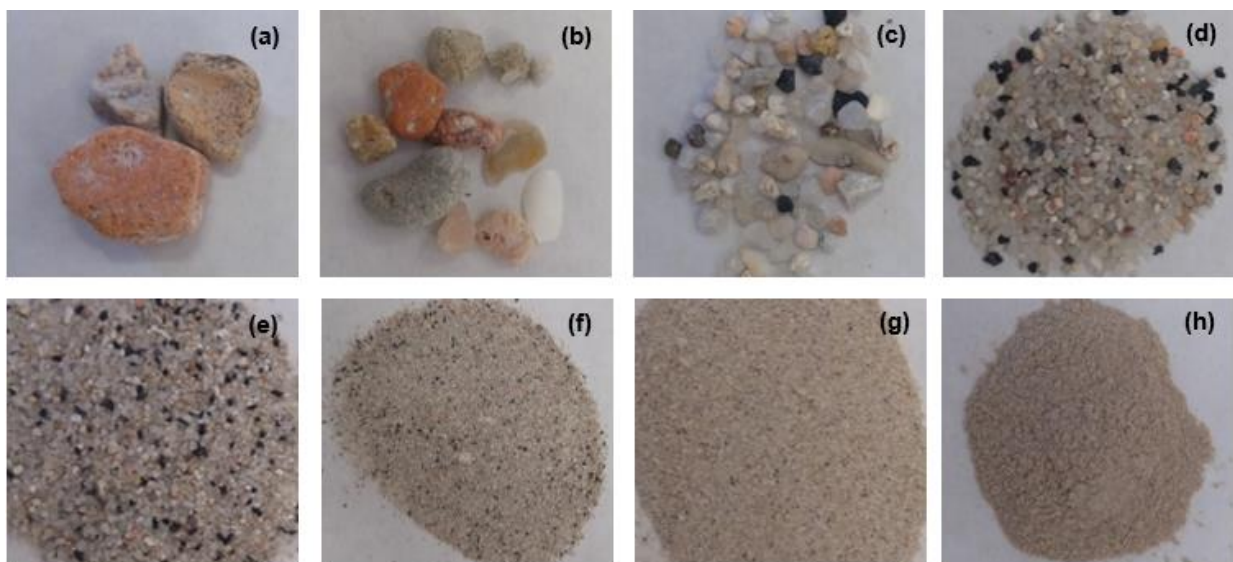


Figura A 26 - Análise granulométrica provete CS_C: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Caso de estudo 3 – Palácio da Independência

Amostra PI_M – Ensaios químicos e mineralógicos

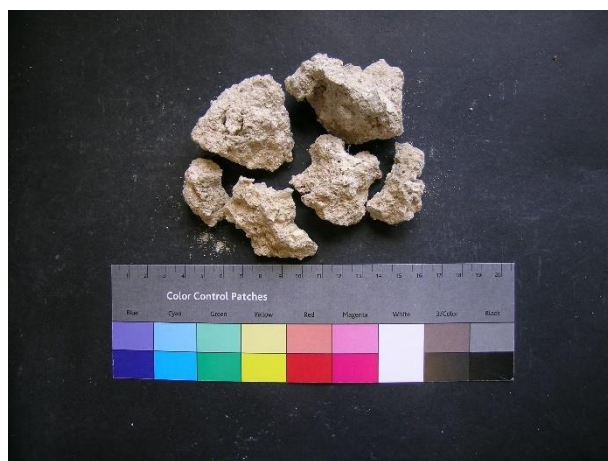


Figura A 27 – Amostra PI_M seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

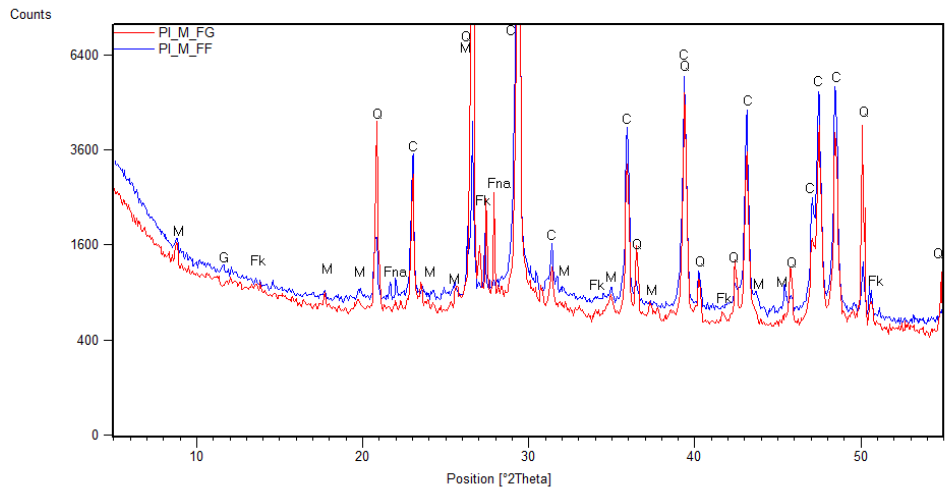


Figura A 28 - Difratoograma para o provete PI_M

Fração global: vermelho; Fração fina: azul
Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respectivamente; Q – Quartzo; C – Calcite

ATG/dTG/ATD

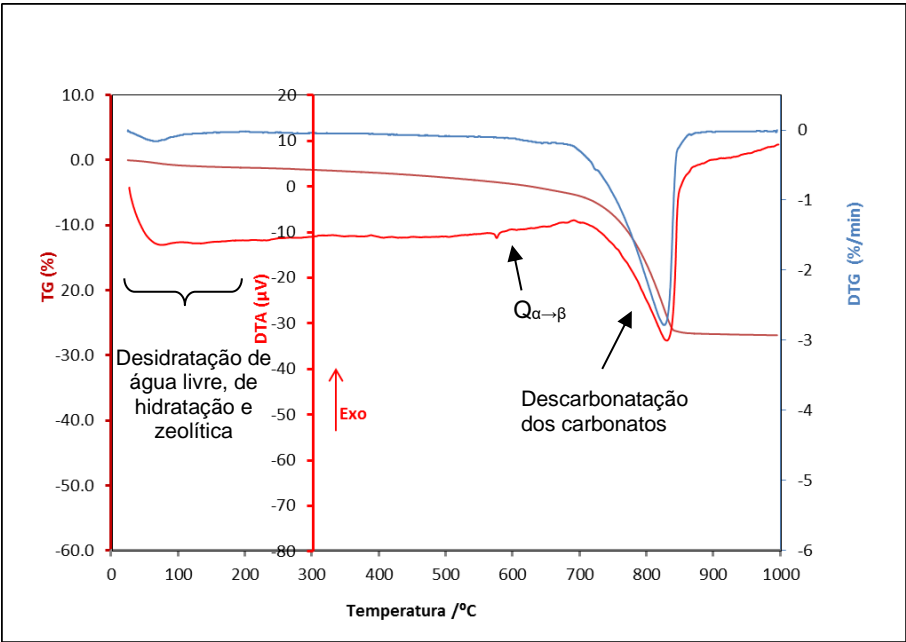


Figura A 29 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PI_M

Resultados: ensaio de análise granulométrica

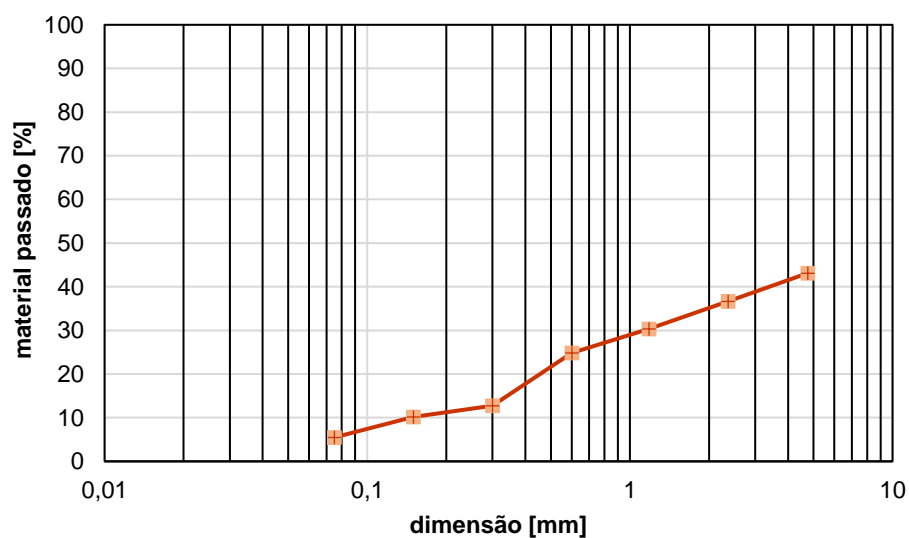


Figura A 30 – Curva granulométrica do provete PI_M

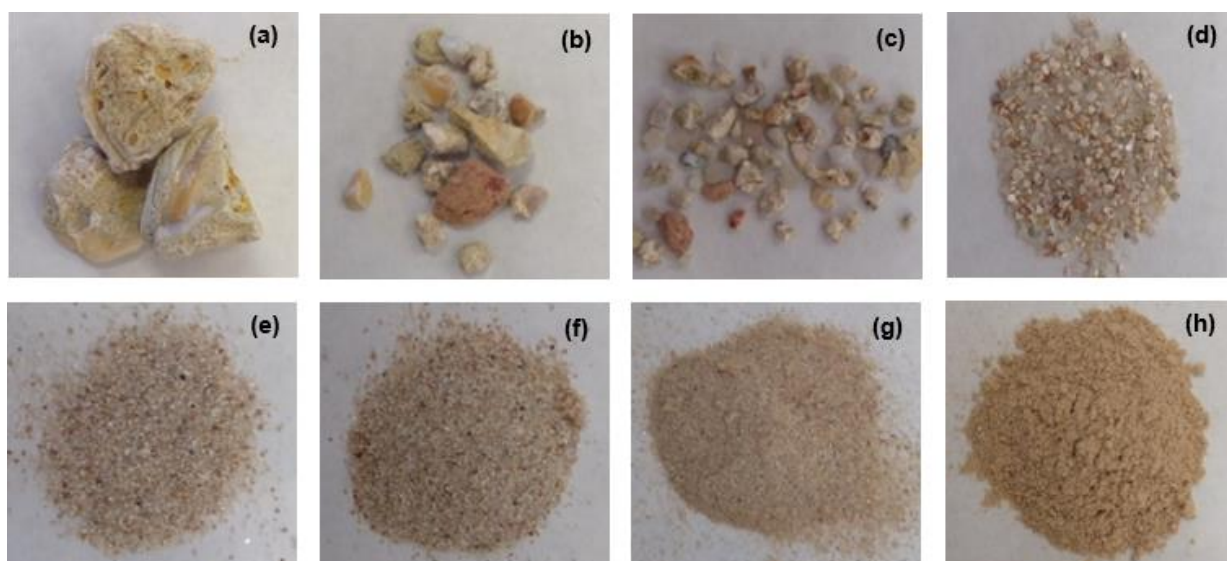


Figura A 31 - Análise granulométrica provete PI_M: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Caso de estudo 4 – Escola Secundária e Básica Gil Vicente

Amostra EGV_M1 – Ensaio físico-mecânicos, químicos e mineralógicos



Figura A 32 - Amostra EGV_M1 (a) amostra com fragmentos EGV_M1.1 e EGV_M1.2 (b e c)

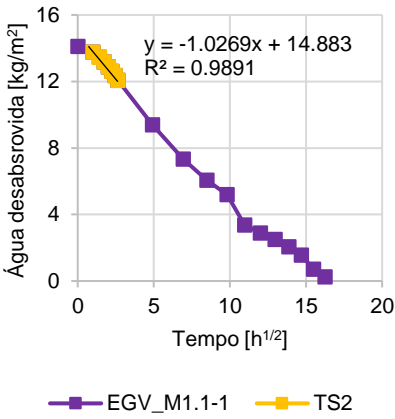
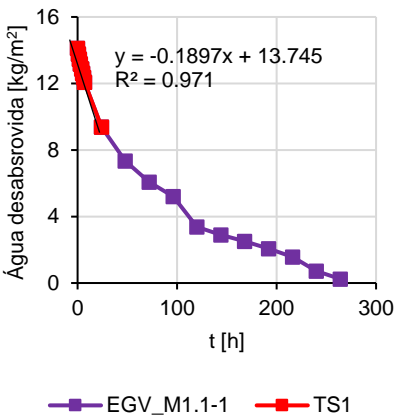
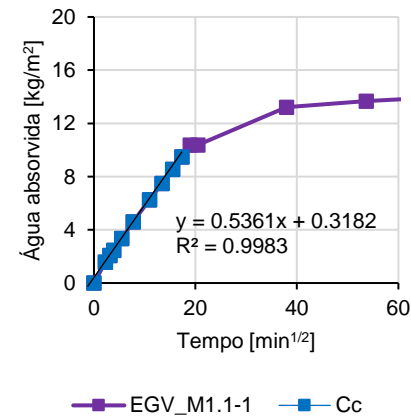


Figura A 33 – Face do provete EGV_M1.1 em contacto com a água

Provete: EGV_M1.1

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: EGV_M1.1 - 0.004089 m²



Provete: EGV_M1.2

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

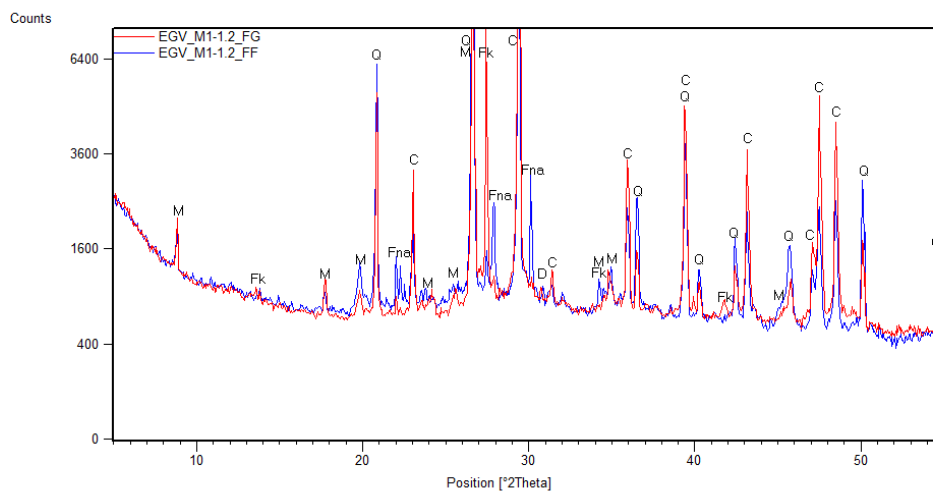


Figura A 34 - Difratograma para o provete EGV_M1.2

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; C – Calcite; Q – Quartzo; D – Dolomite

ATG/dTG/ATD

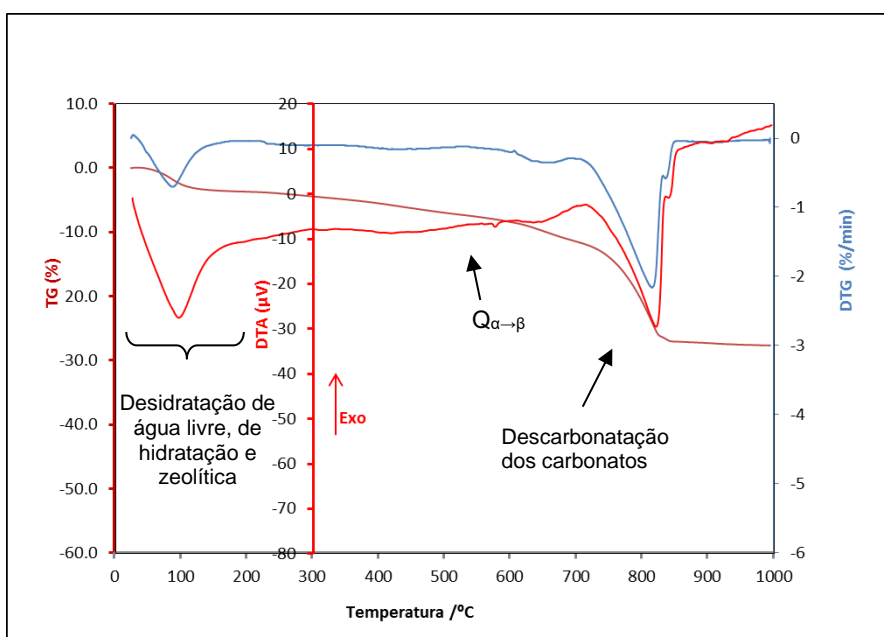


Figura A 35 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete EGV_M1.2

Resultados: ensaio de análise granulométrica

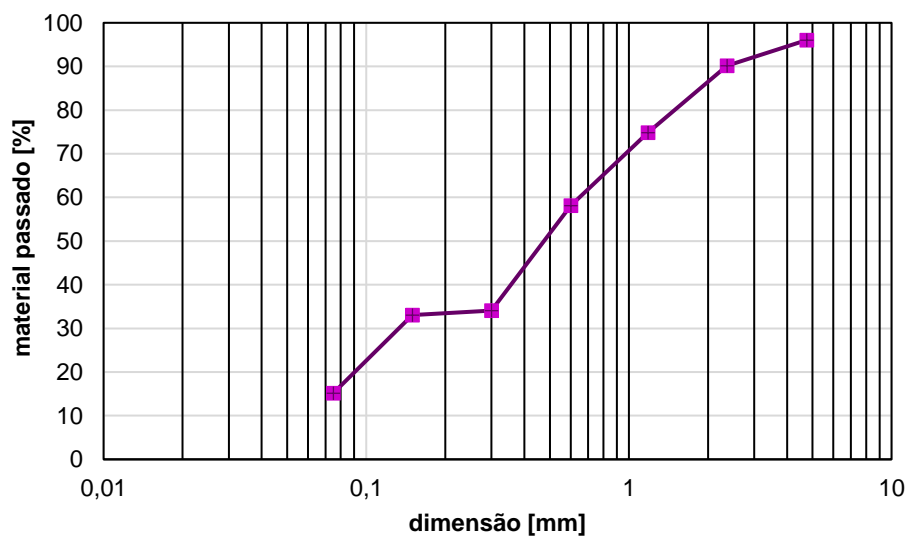


Figura A 36 - Curva granulométrica do provete EGV_M1.2

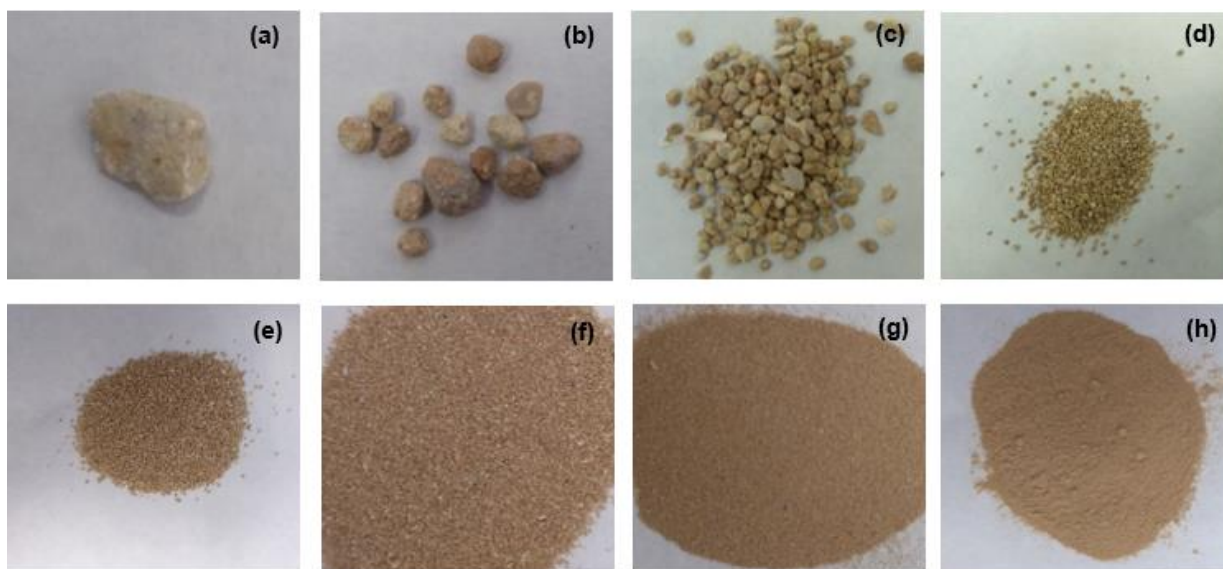


Figura A 37 - Análise granulométrica provete EGV_M1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

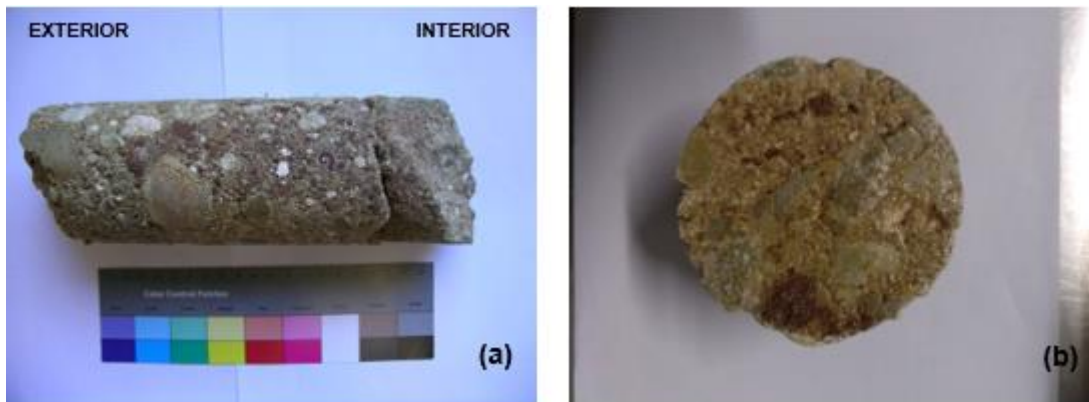
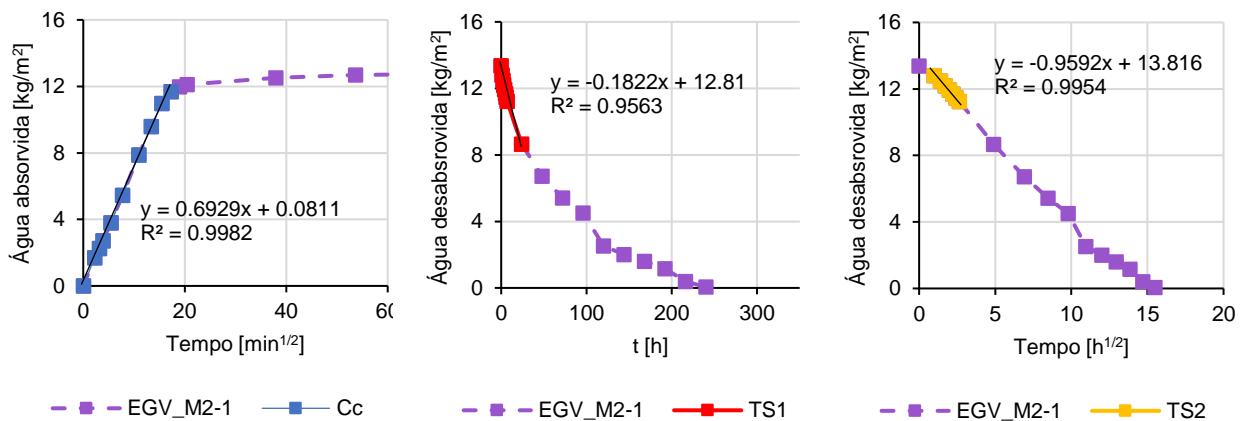


Figura A 38 – Amostra EGV_M2 (a) face do provete EGV_M2.1 em contacto com a água

Provete: EGV_M2.1

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: EGV_M2.1 - 0.004218 m²



Provete: EGV_M2.2

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

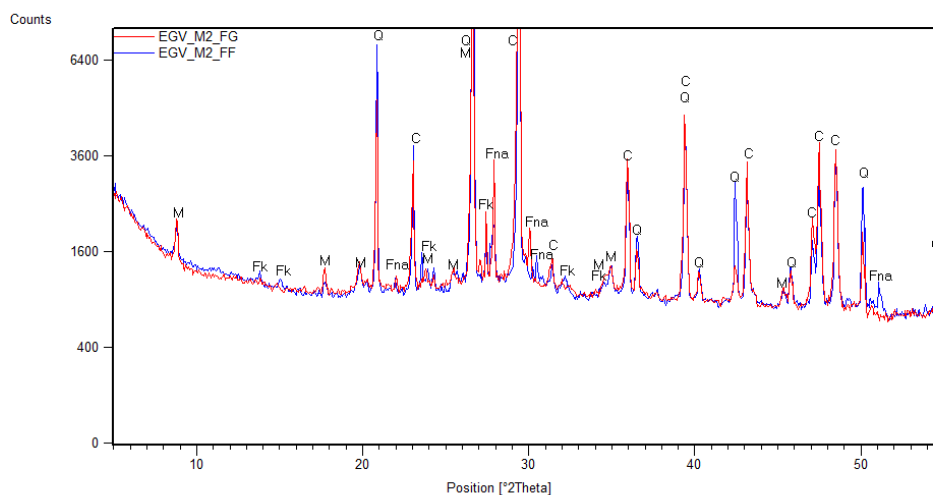


Figura A 39 - Difratoograma para o provete EGV_M2.2

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Feldspato potássico e sódico, respectivamente; C – Calcite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

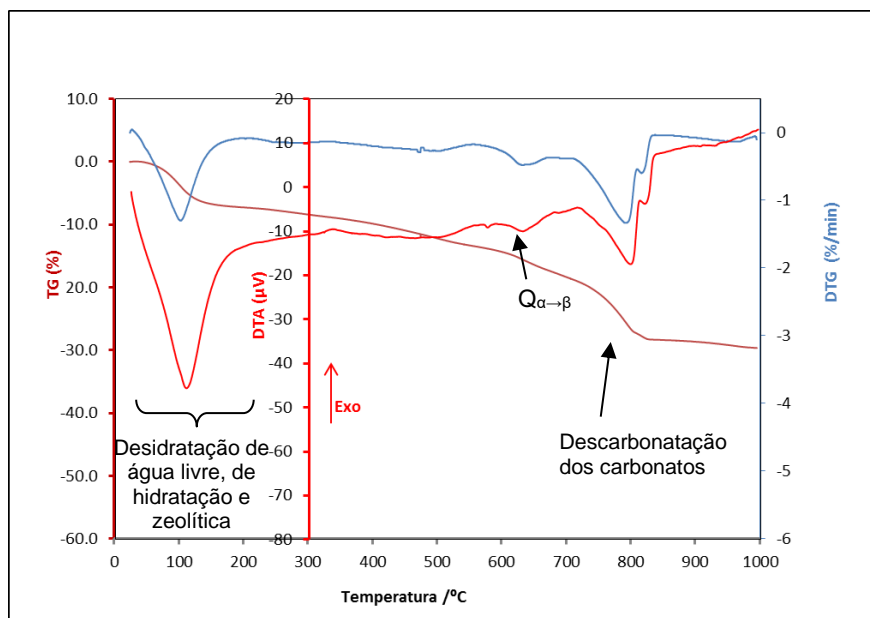


Figura A 40 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete EGV_M2.2

Resultados: ensaio de análise granulométrica

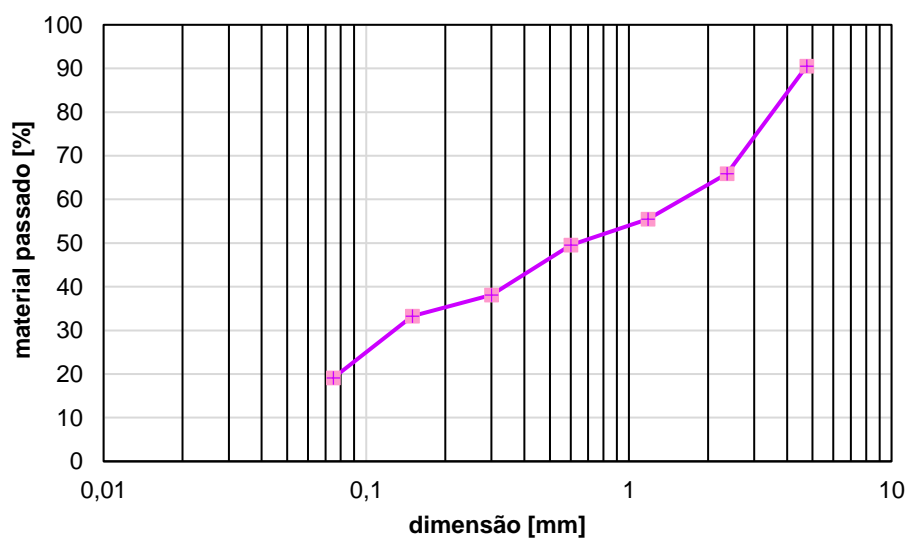


Figura A 41 - Curva granulométrica do provete EGV_M2.2

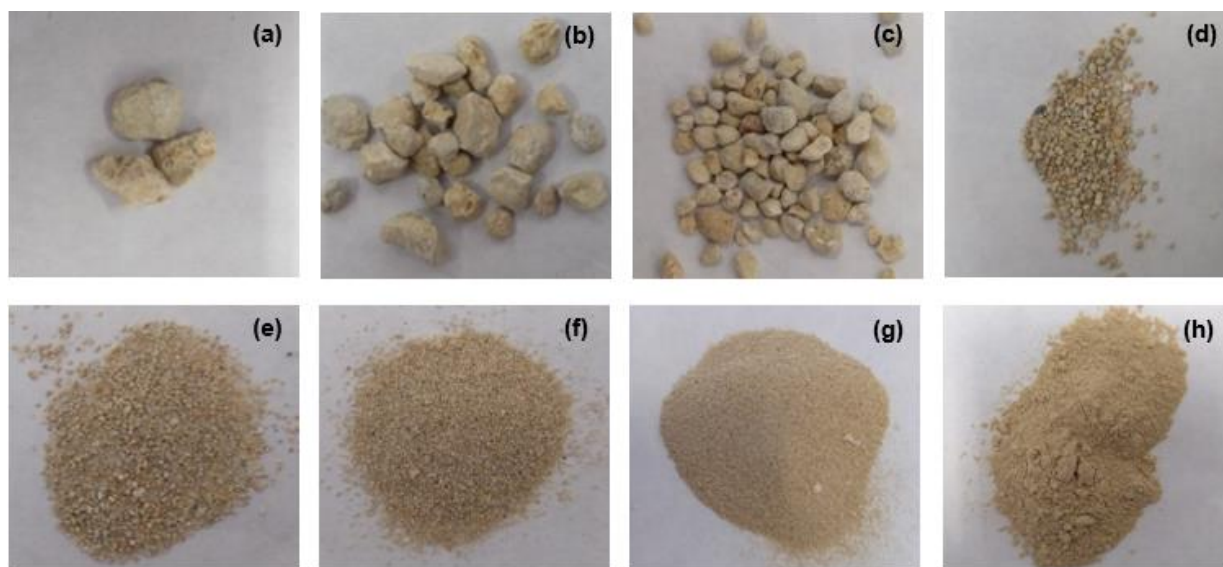


Figura A 42 - Análise granulométrica provete EGV_M2.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Caso de estudo 5 – Palácio da Rosa

Amostra PR_M3 – Ensaios químicos e mineralógicos



Figura A 43 – Amostra PR_M3.1 selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

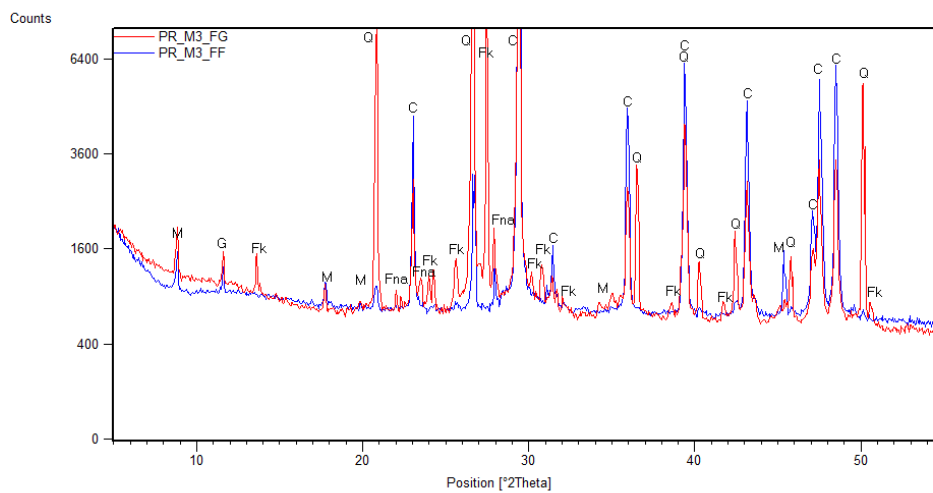


Figura A 44 - Difratoograma para o provete PR_M3.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; C – Calcite; Q – Quartzo

ATG/dTG/ATD

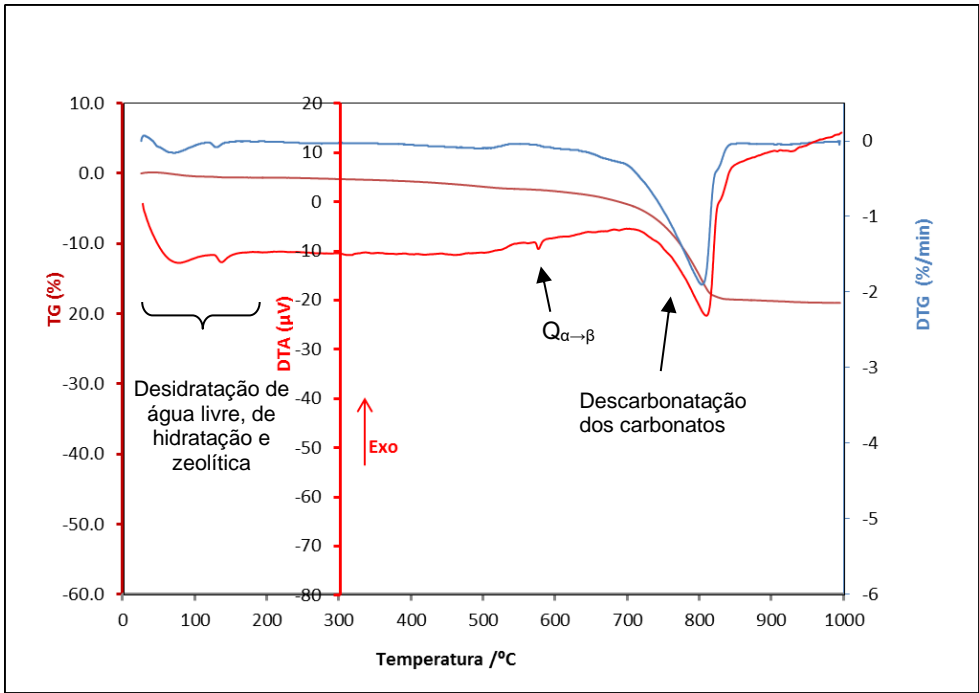


Figura A 45 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PR_M3.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

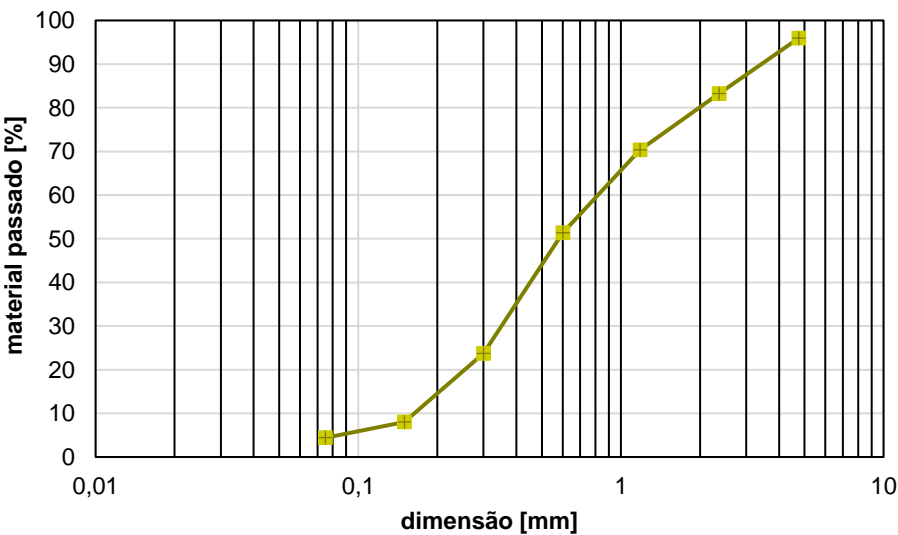


Figura A 46 - Curva granulométrica do provete PR_M3.1

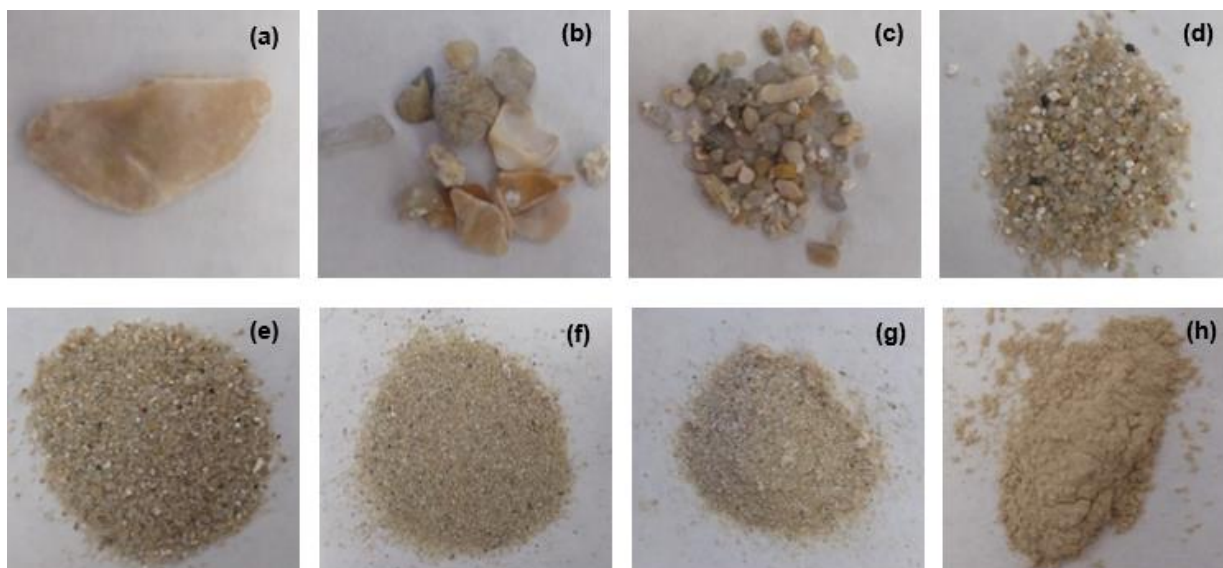


Figura A 47 - Análise granulométrica provete PR_M3.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Amostra PR_M6 – Ensaios químicos e mineralógicos

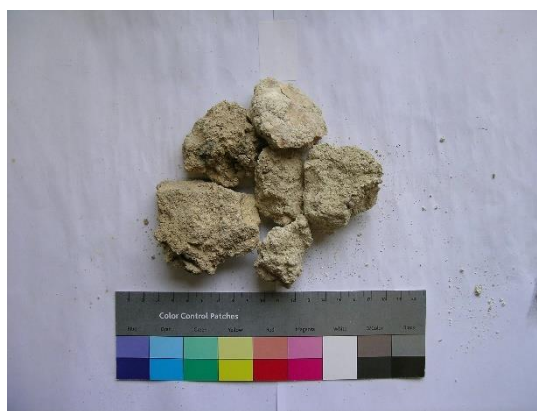


Figura A 48 – Amostra PR_M6 selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

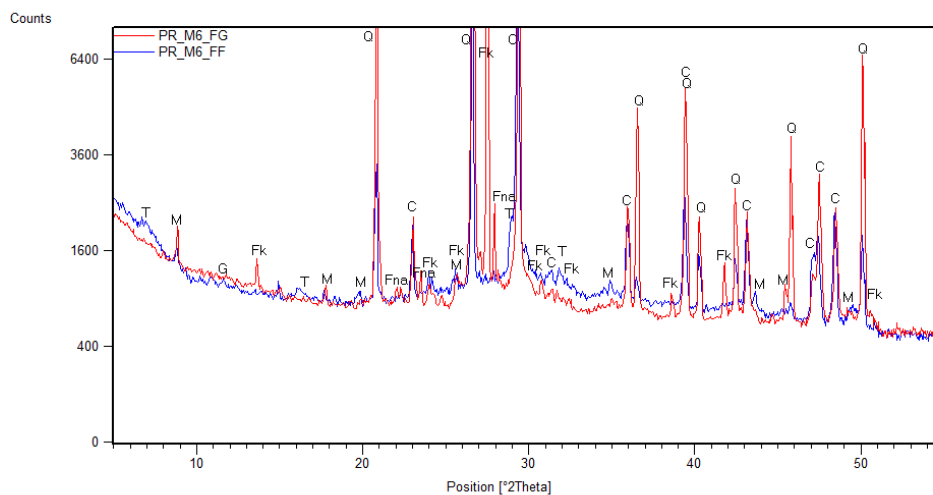


Figura A 49 - Difratoograma para o provete PR_M6.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: T – Tobermorite; M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; C – Calcite; Q – Quartzo

ATG/dTG/ATD

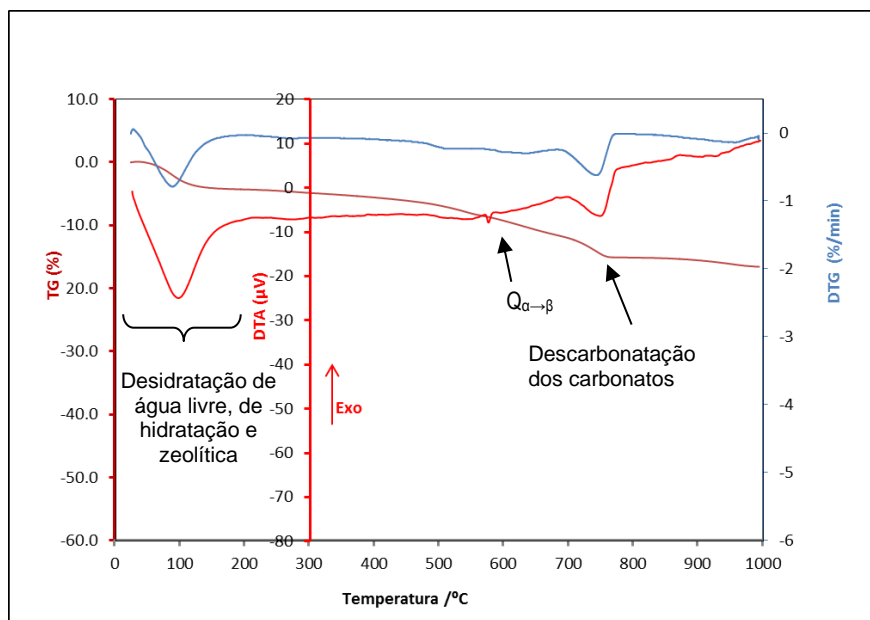


Figura A 50 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete PR_M6.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

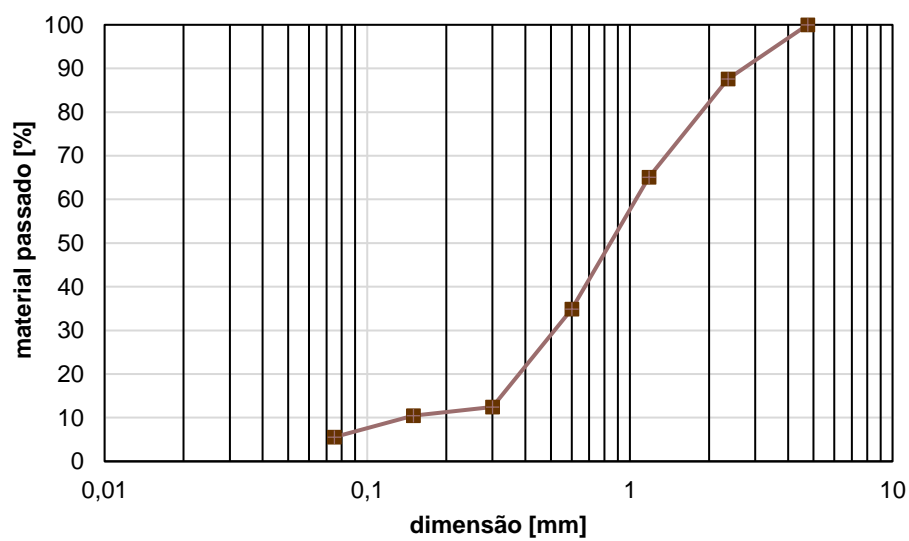


Figura A 51 - Curva granulométrica do provete PR_M6.1

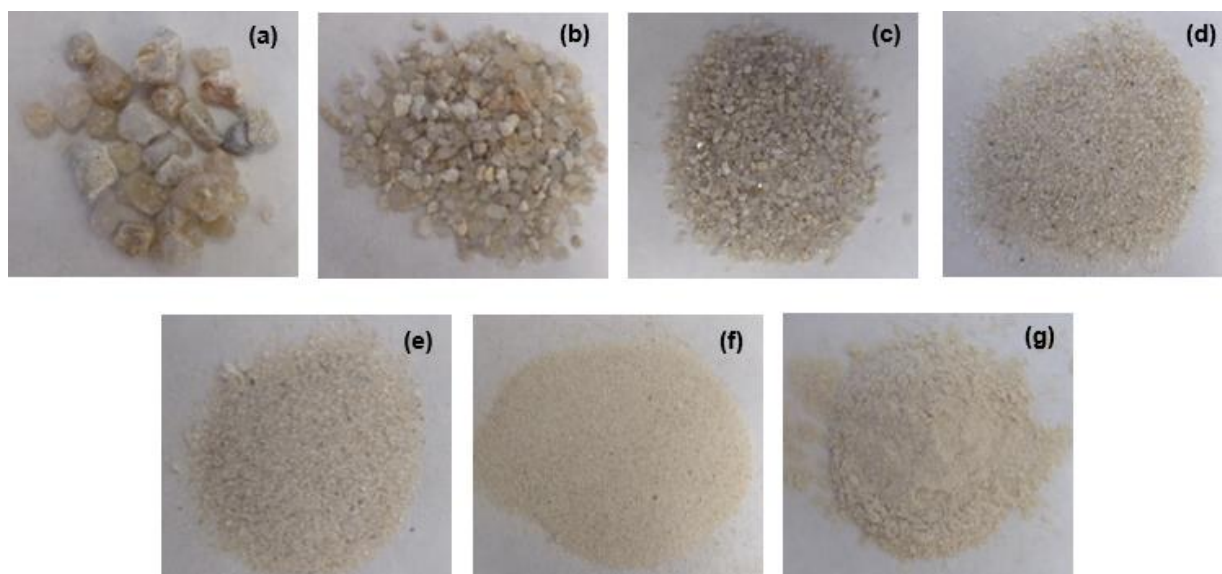


Figura A 52 - Análise granulométrica provete PR_M6.1: (a) fração 2,36 mm; (b) fração 1,18 mm; (c) fração 600 µm; (d) fração 300 µm; (e) fração 150 µm; (f) fração 75 µm; (g) fração < 75 µm

Caso de estudo 6 – Corpo Santo Hotel

Amostra CSH_T1 – Ensaio físico-mecânico

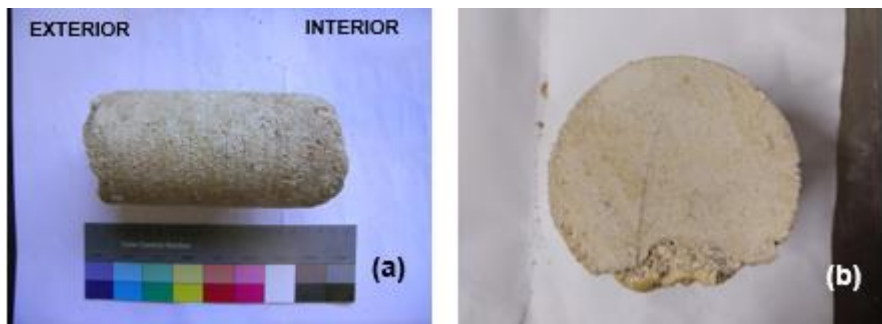
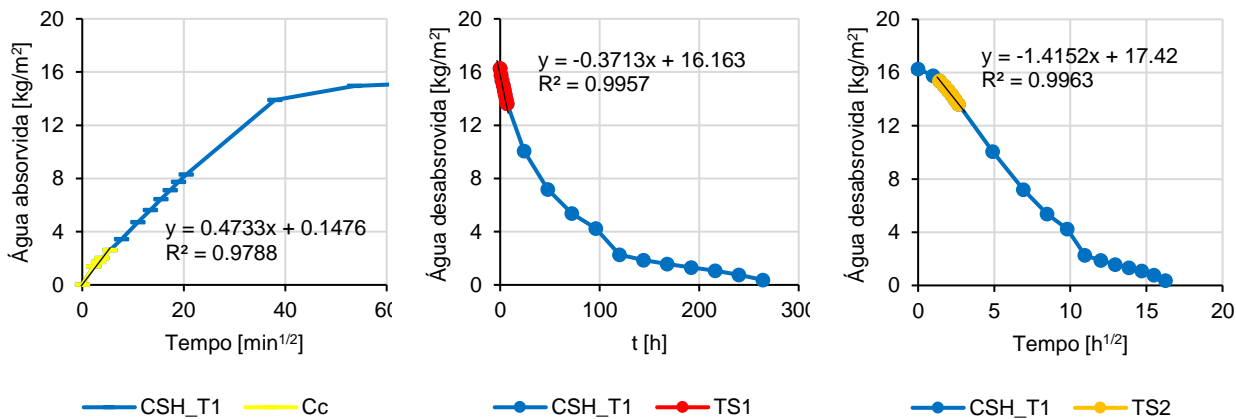


Figura A 53 – Amostra CSH_T1 (a) e face do provete CSH_T1 em contacto com a água

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: CSH_T1.1 - 0.004217 m²



Amostra CSH_T2 – Ensaios químicos e mineralógicos



Figura A 54 – Amostra CSH_T2 selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

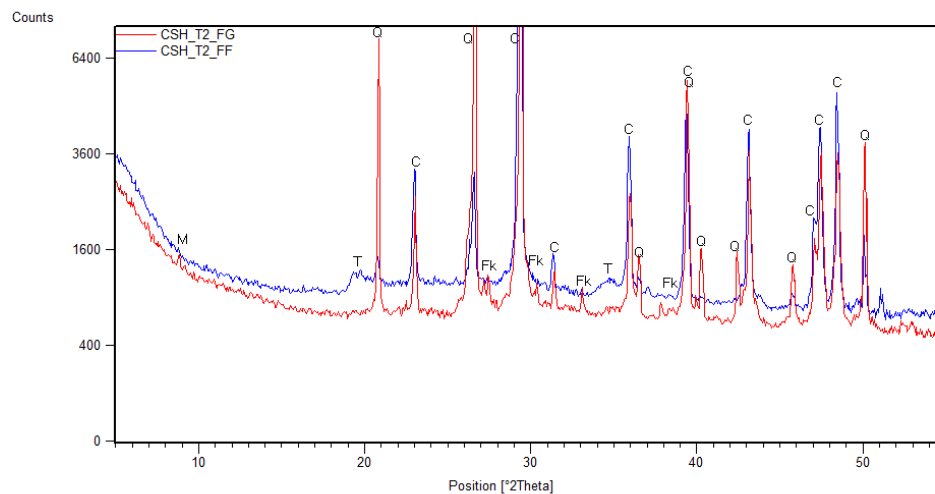


Figura A 55 - Difratoograma para o provete CSH_T2.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: T – Tobermorite; M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; C – Calcite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

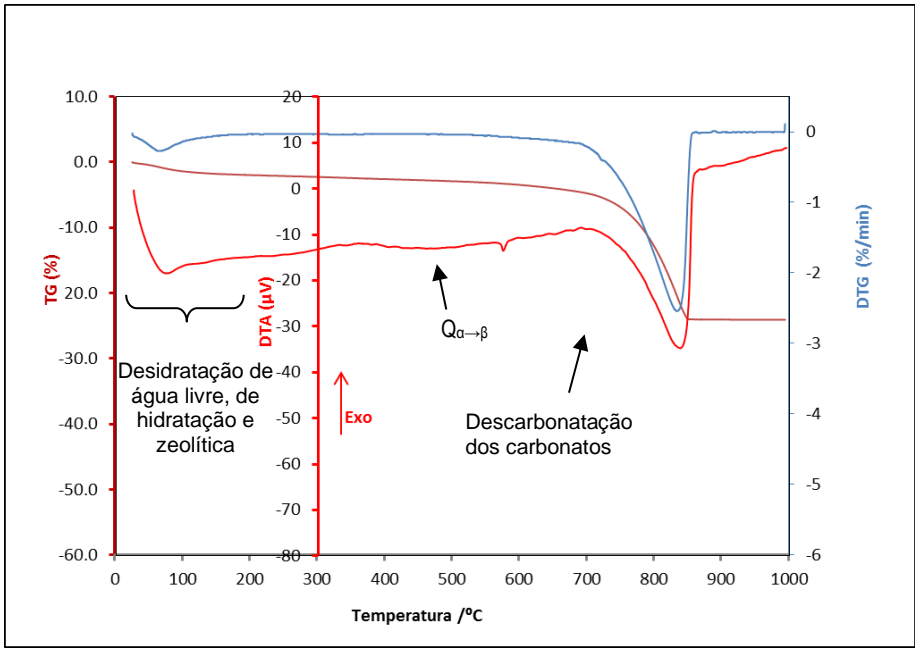


Figura A 56 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete CSH_T2.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

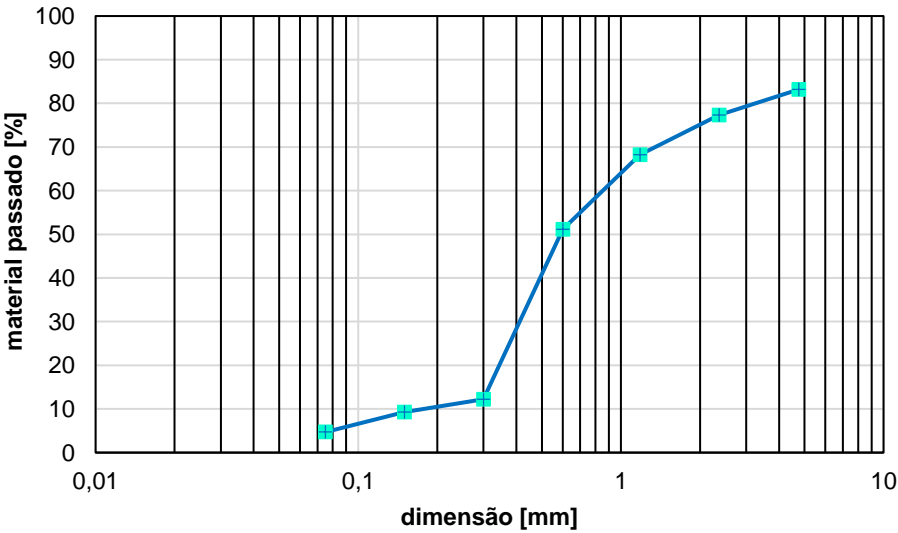


Figura A 57 – Curva granulométrica do provete CSH_T2.1

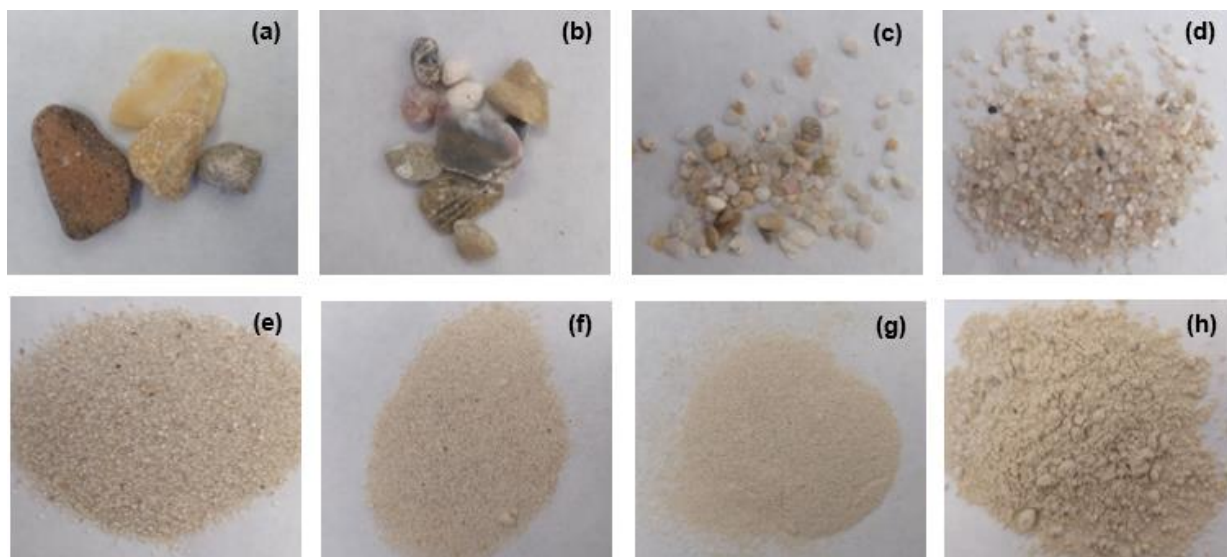


Figura A 58 - Análise granulométrica provete CSH_T2.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Caso de estudo 7 – Condomínio dos Terraços de Bragança

Amostra TB_M1 – Ensaio físico-mecânicos, químicos e mineralógicos

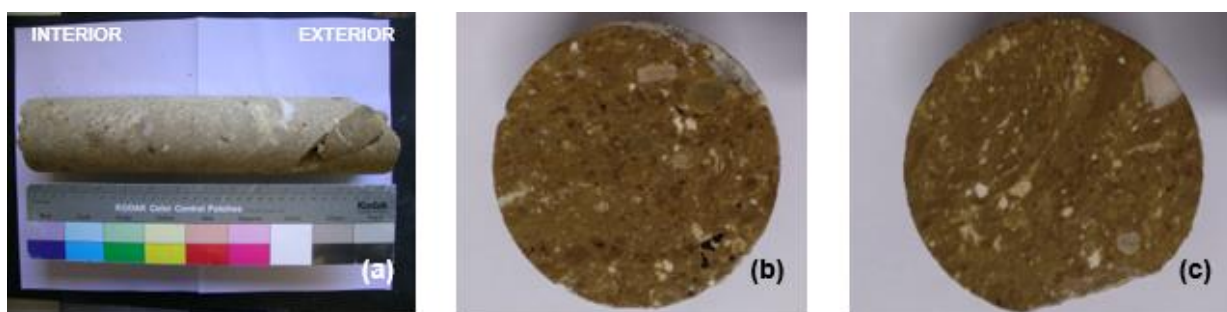
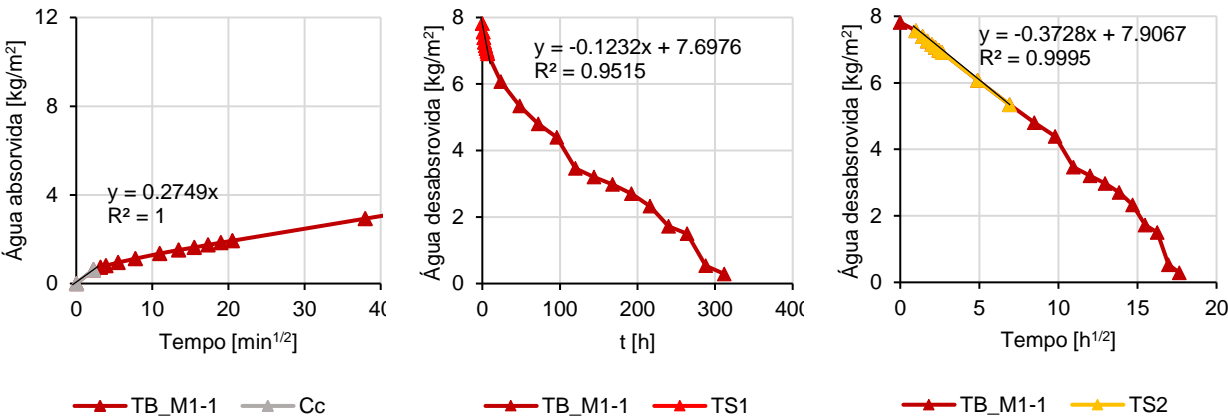


Figura A 59 – Amostra TB_M1 (a) face do provete TB_M1.1 em contacto com a água (b) e face do provete TB_M1.2 em contacto com a água

Provete: TB_M1.1

Resultados: Capilaridade e secagem

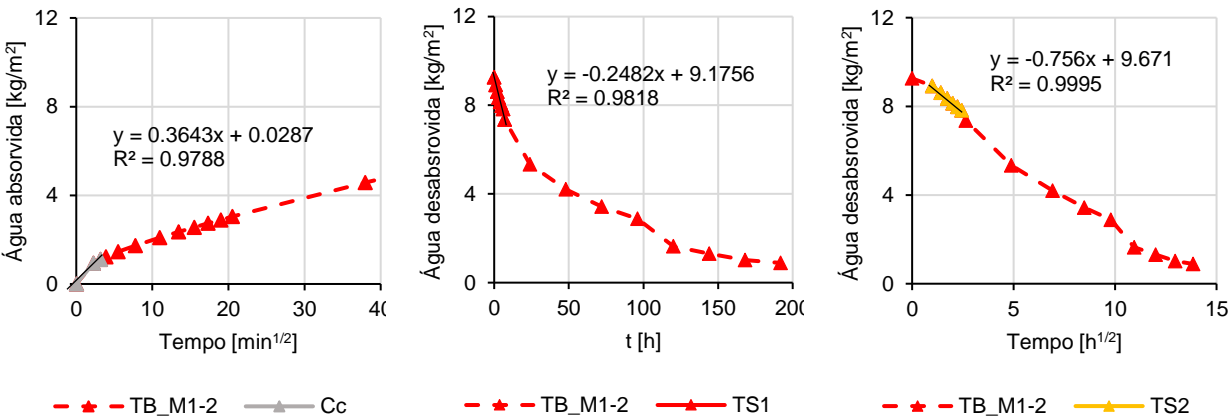
Superfície do provete: TB_M1.1 - 0.004353 m²



Provete: TB_M1.2

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: TB_M1.2 - 0.004340 m²



Provete: TB_M1.3

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

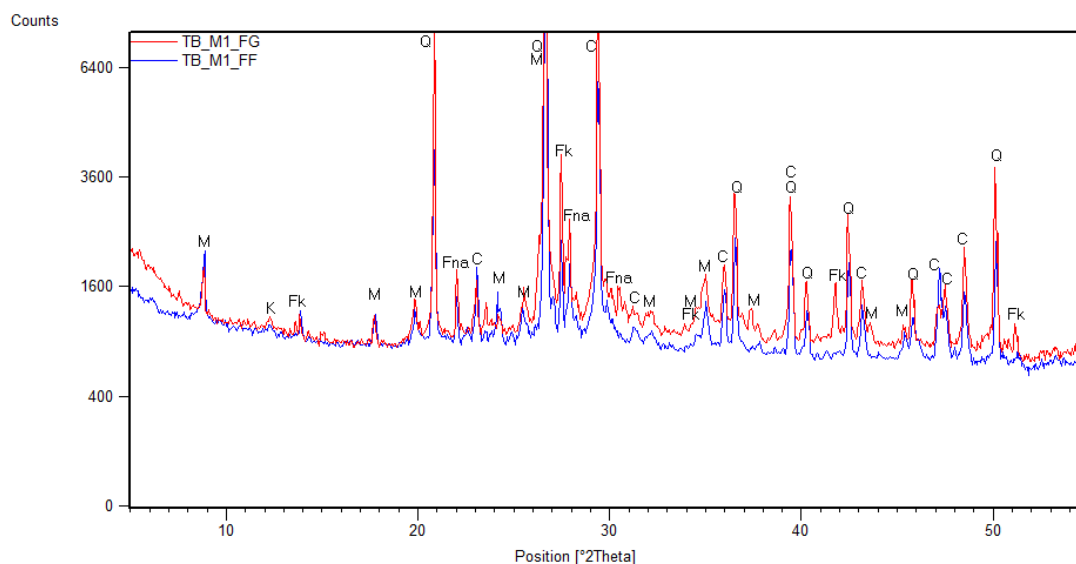


Figura A 60 - Difratoograma para o provete TB_M1.3

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respectivamente; Q – Quartzo; C – Calcite

ATG/dTG/ATD

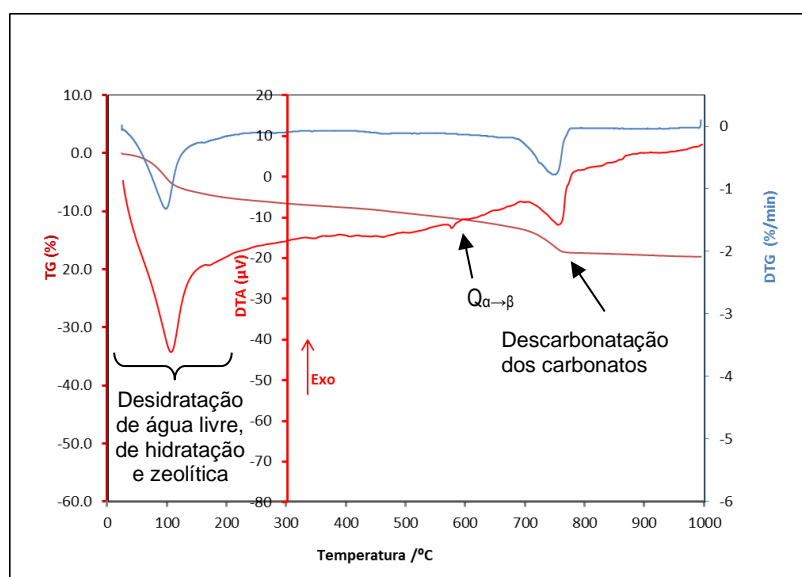


Figura A 61 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_M1.3

Resultados: ensaio de análise granulométrica

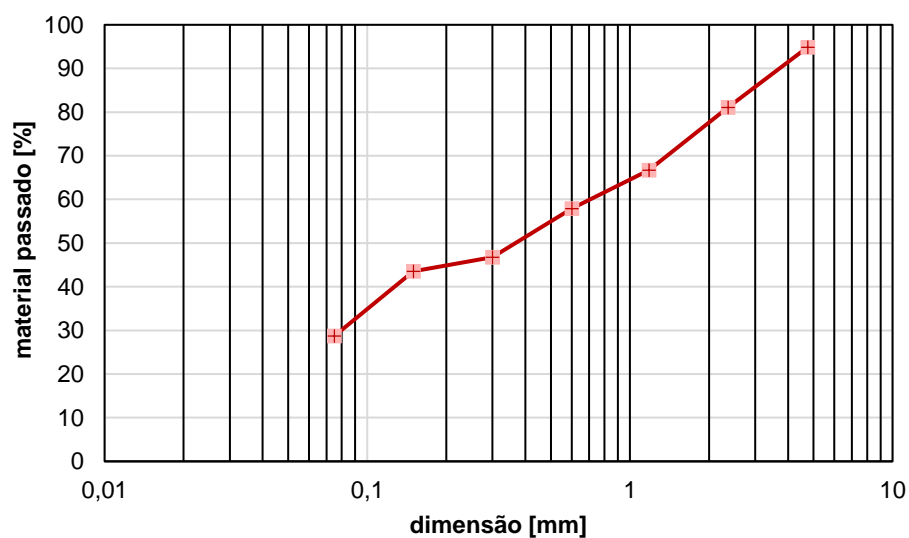


Figura A 62 - Curva granulométrica do provete TB_M1.3

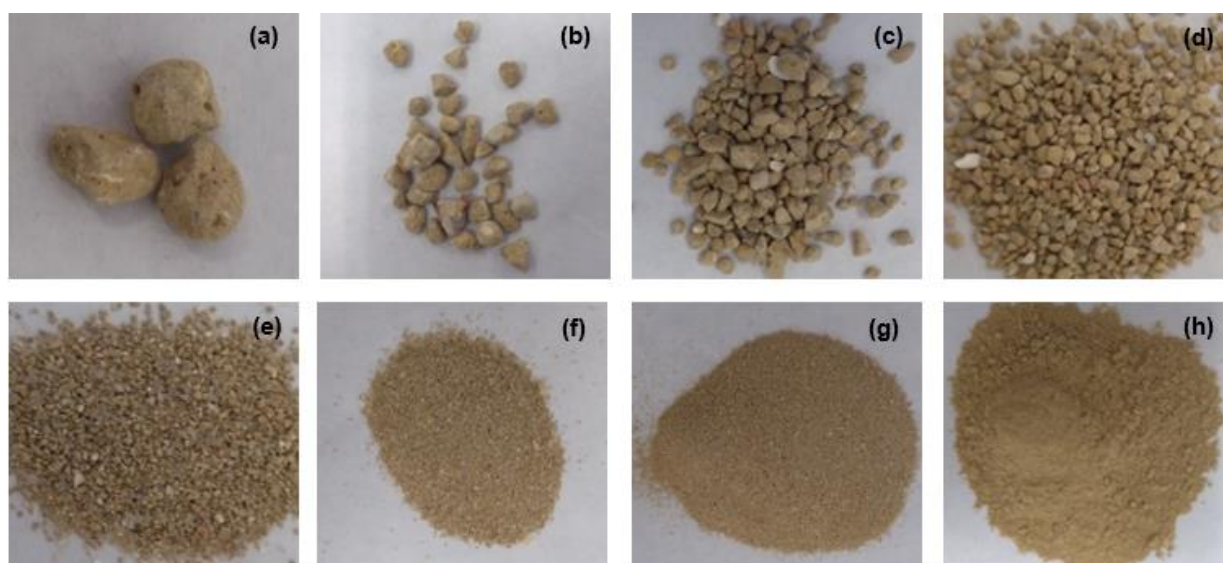


Figura A 63 - Análise granulométrica provete TB_M1.3: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

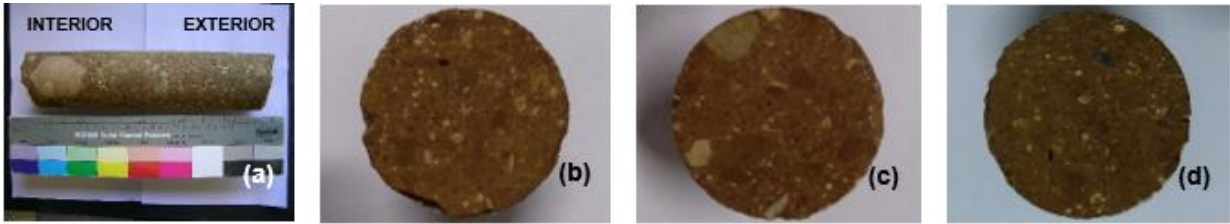
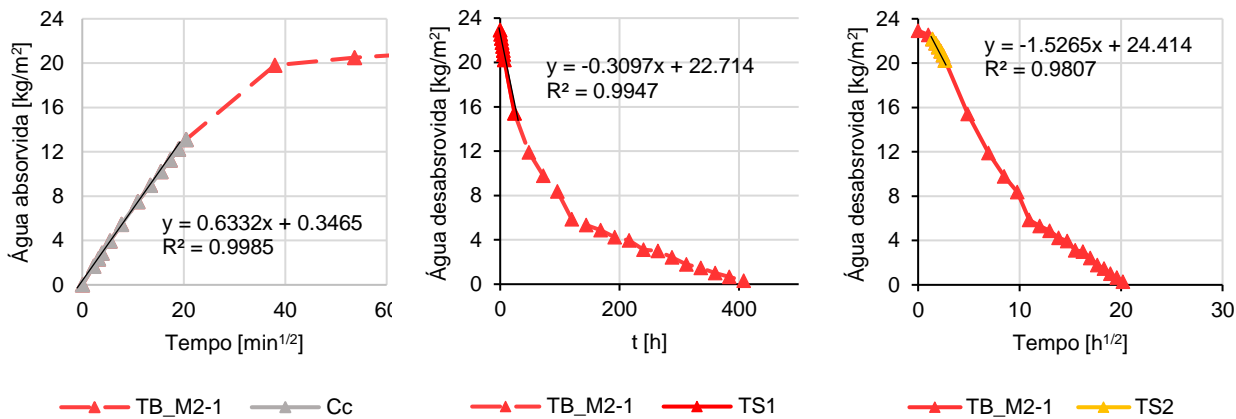


Figura A 64 – Amostra TB_M2 (a) face do provete TB_M2.1 (b) provete TB_M2.2 (c) e TB_M2-3 (d) em contacto com a água

Provete: TB_M2.1

Resultados: Capilaridade e secagem

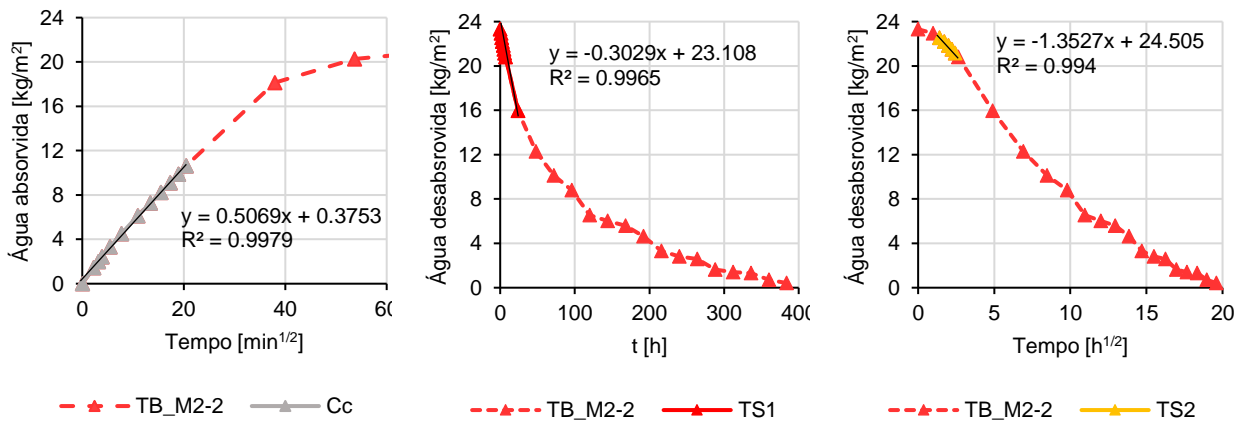
Superfície do provete: TB_M2.1 - 0.004342 m²



Provete: TB_M2.2

Resultados: Capilaridade e secagem

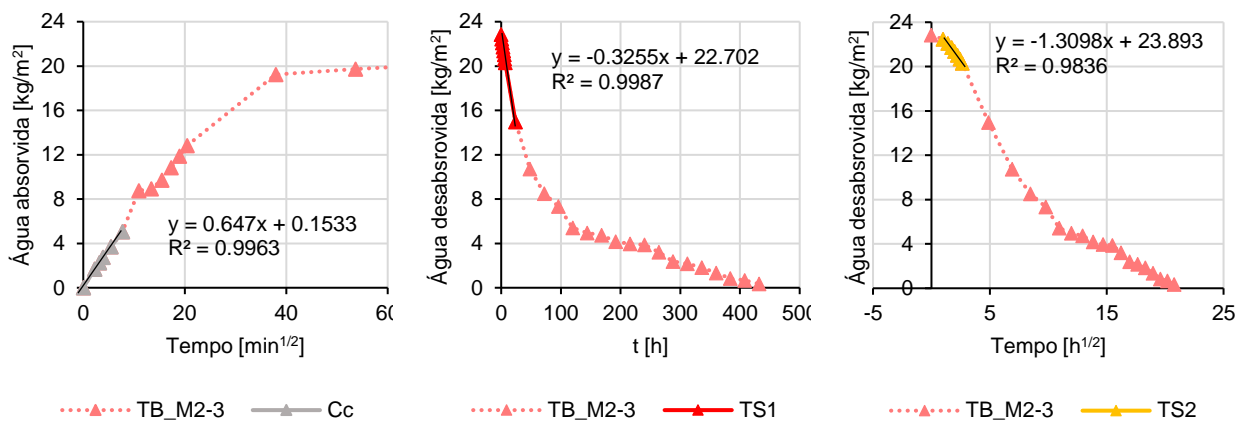
Superfície do provete: TB_M2.2 - 0.004307 m



Provete: TB_M2.3

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: TB_M2.3 - 0.004255 m²



Provete: TB_M2.4

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

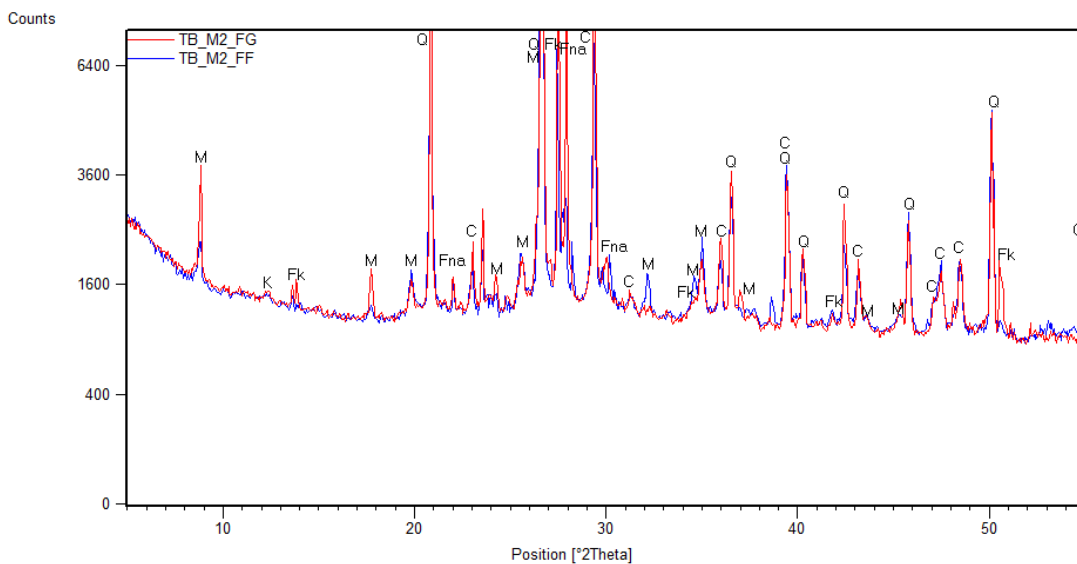


Figura A 65 - Difratoograma para o provete TB_M2.4

Fração global: vermelho; Fração fina: azul
 Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; Q – Quartzo; C – Calcite

ATG/dTG/ATD

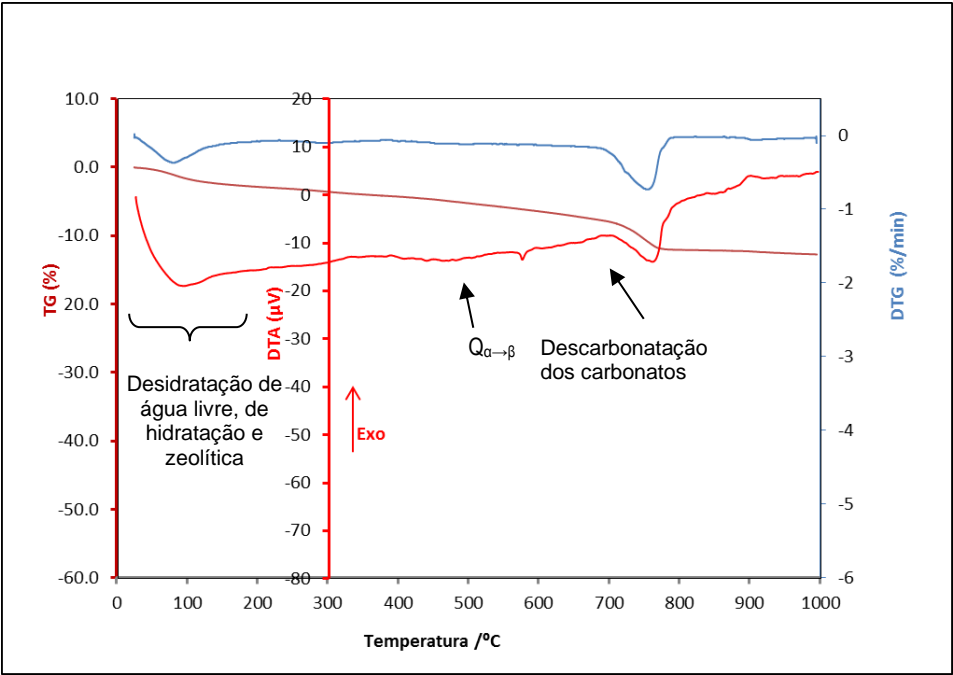


Figura A 66 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_M2.4

Resultados: ensaio de análise granulométrica

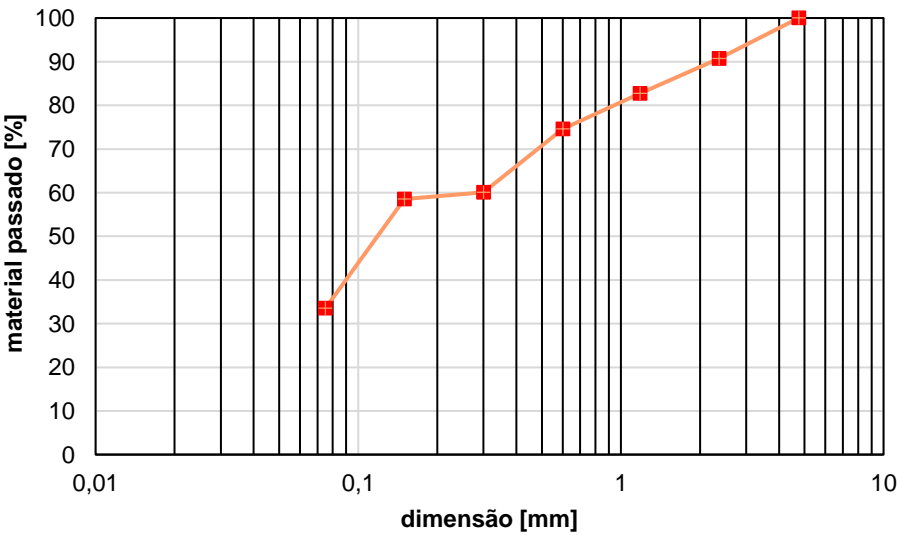


Figura A 67 - Curva granulométrica do provete TB_M2.4

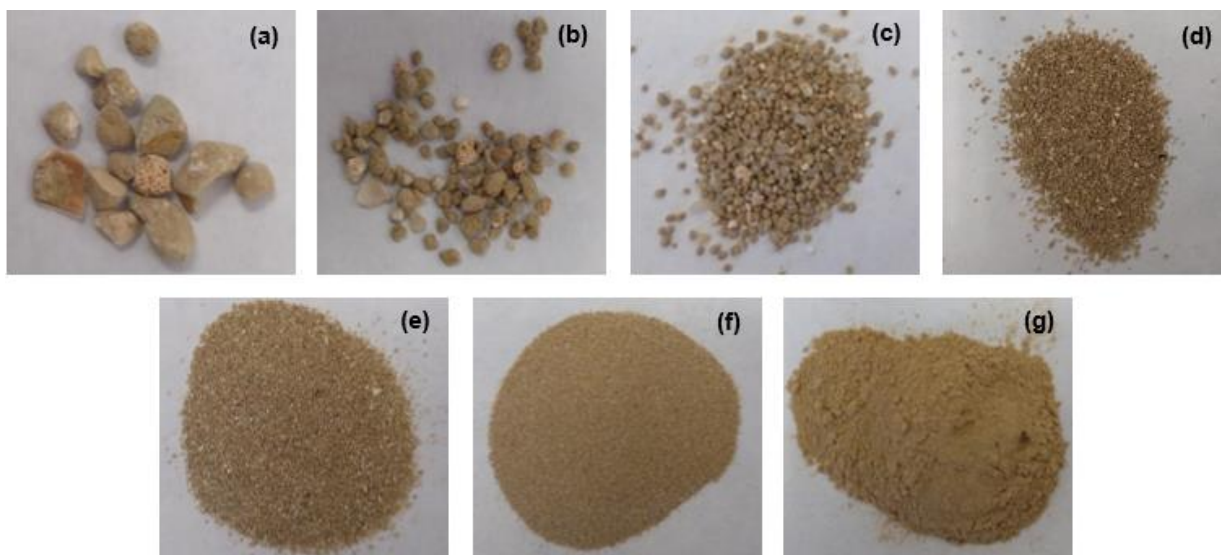


Figura A 68 - Análise granulométrica provete TB_M2.4: (a) fração 2,36 mm; (b) fração 1,18 mm; (c) fração 600 µm; (d) fração 300 µm; (e) fração 150 µm; (f) fração 75 µm; (g) fração < 75 µm

Amostra TB_T1 – Ensaios físico-mecânicos, químicos e mineralógicos

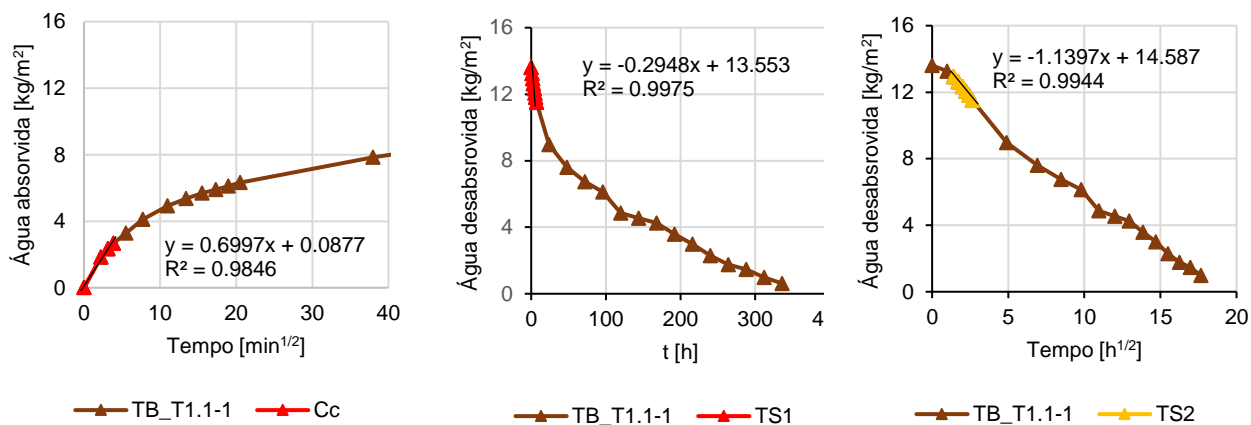


Figura A 69 – Amostra TB_T1 e fragmentos (a) face do provete TB_T1.1 (b) e do provete TB_T1.2 (c) em contacto com a água

Provete: TB_T1.1

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: TB_T1.1 - 0.004382 m²

**Provete: TB_T1.2**

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

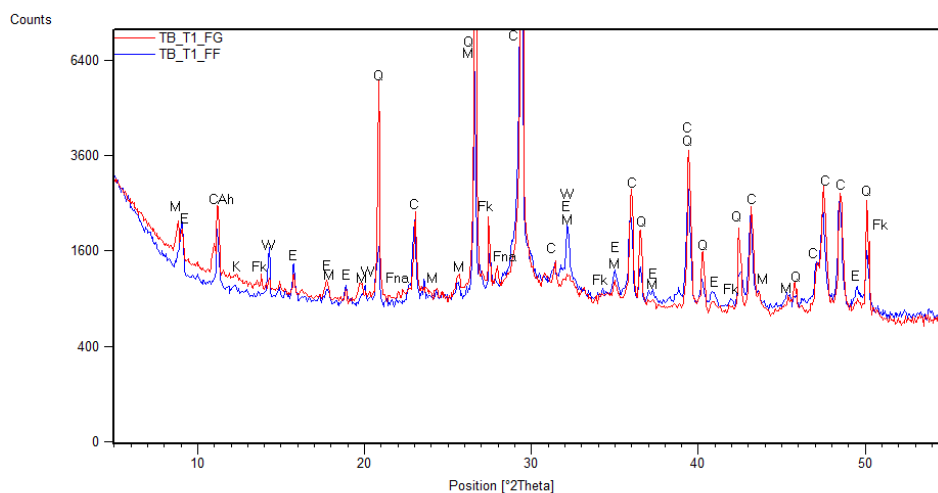
DRX

Figura A 70 - Difractograma para o provete TB_T1.2

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; Q – Quartzo; C – Calcite

ATG/dTG/ATD

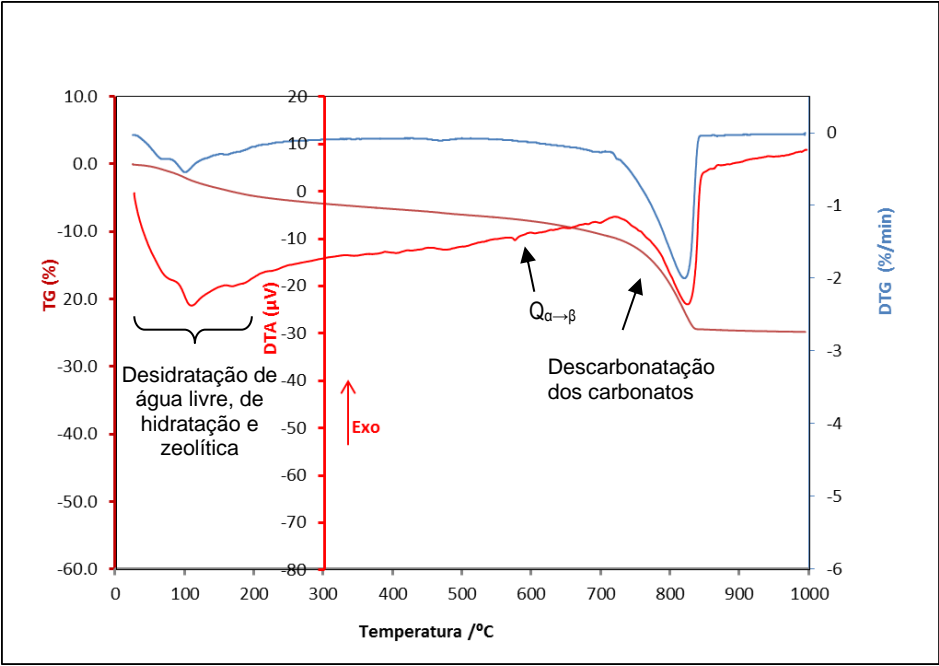


Figura A 71 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete TB_T1.2

Resultados: ensaio de análise granulométrica

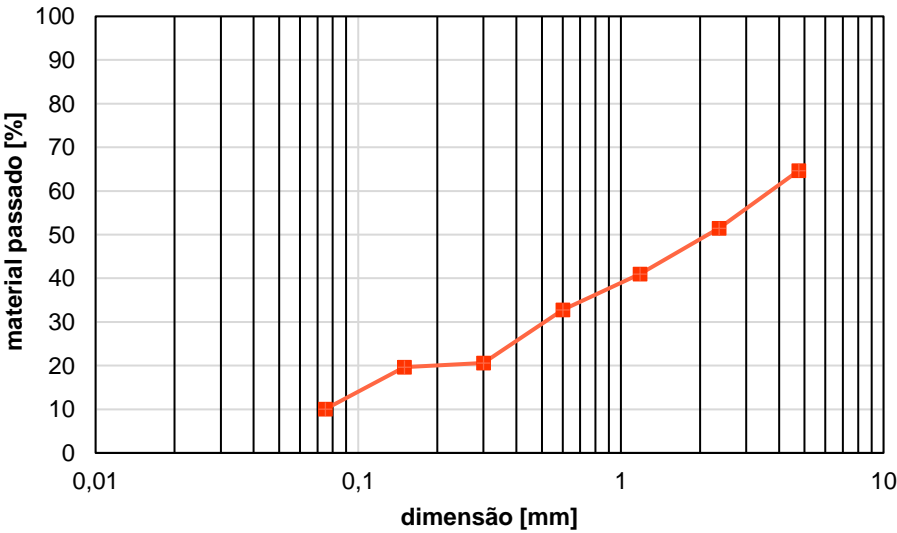


Figura A 72 - Curva granulométrica do provete TB_T1.2

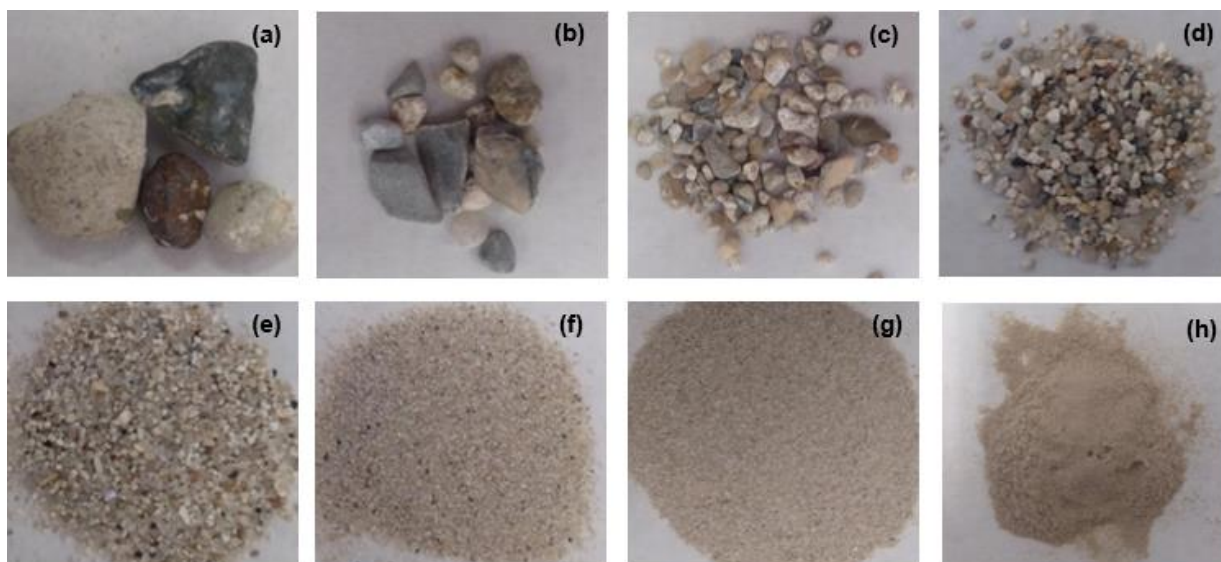
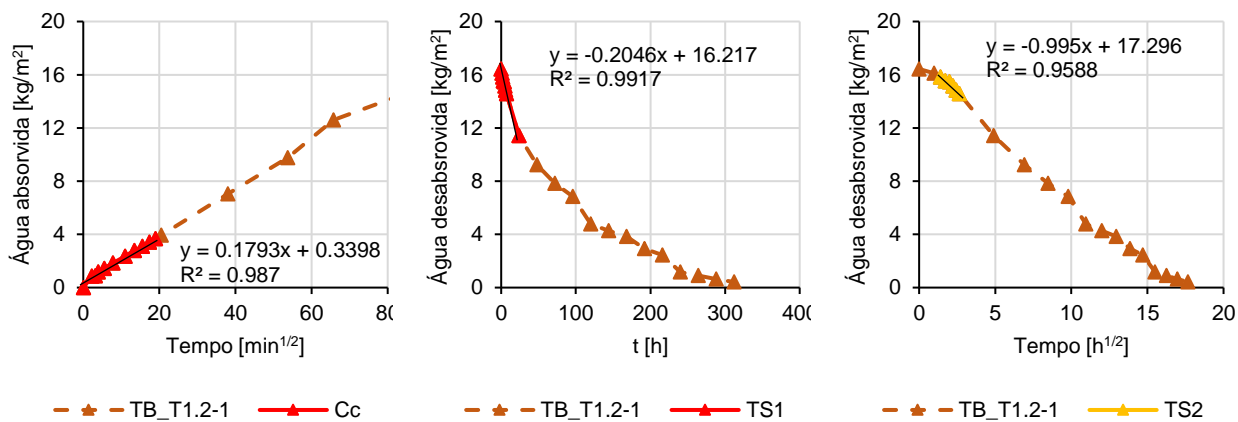


Figura A 73 - Análise granulométrica provete TB_T1.2: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Provete: TB_T1.3

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: TB_T1.3 - 0.004353 m²



Amostra TB_T2 – Ensaios físico-mecânicos, químicos e mineralógicos

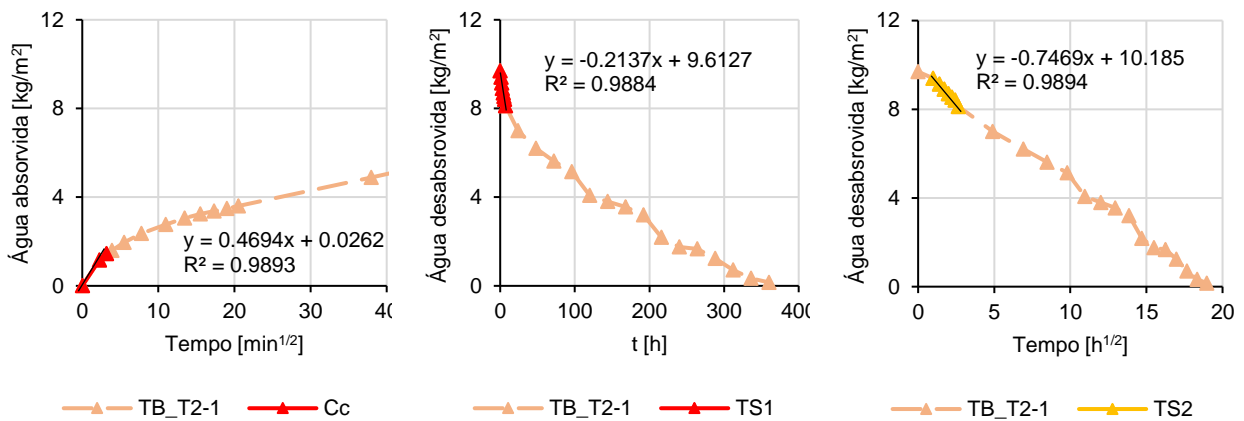


Figura A 74 – Amostra TB_T2 (a) face do provete TB_T2-1 (b) e do provete TB_T2-2 (c) em contacto com a água

Provete: TB_T2.1

Resultados: Capilaridade e secagem

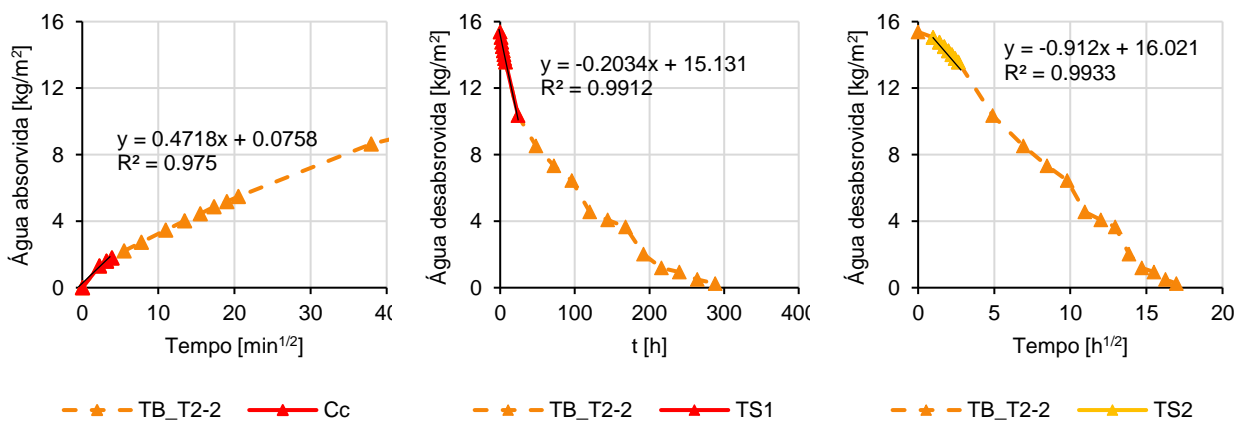
Superfície do provete: TB_T2.1 - 0.004356 m²



Provete: TB_T2.2

Resultados: Capilaridade e secagem

Superfície do provete: TB_T2.2 - 0.004354 m²



Caso de estudo 8 – Edifícios 6-26 da Rua Terreiro do Trigo

Amostra RTT_T – Ensaio químicos e mineralógicos



Figura A 75 – Amostra RTT_T selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

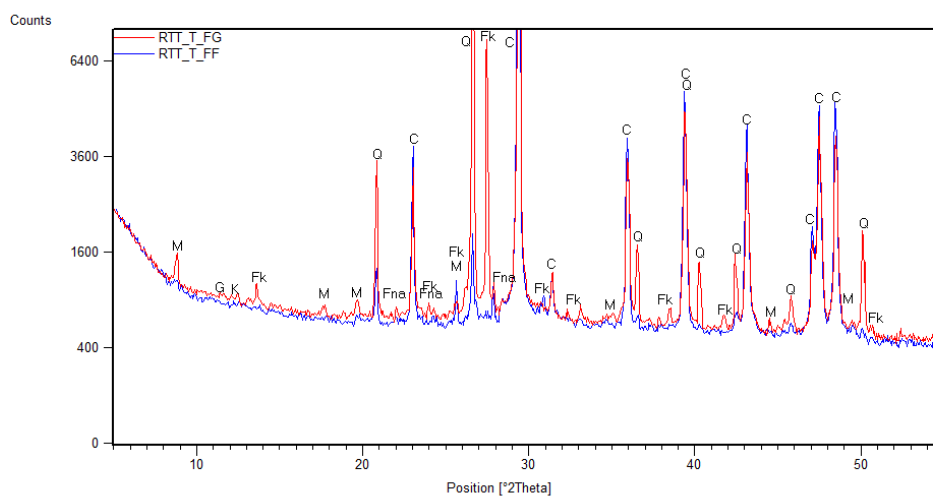


Figura A 76 - Difratoograma para o provete RTT_T.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; K – Caulinite; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico; C – Calcite; Q – Quartzo

ATG/dTG/ATD

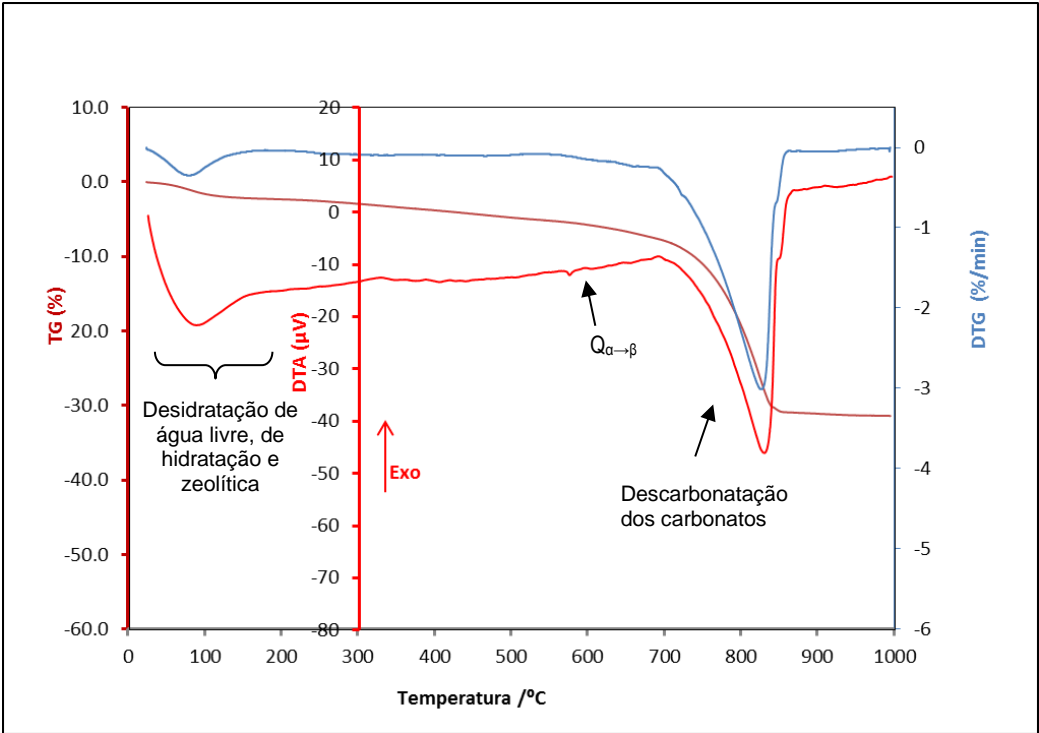


Figura A 77 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_T.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

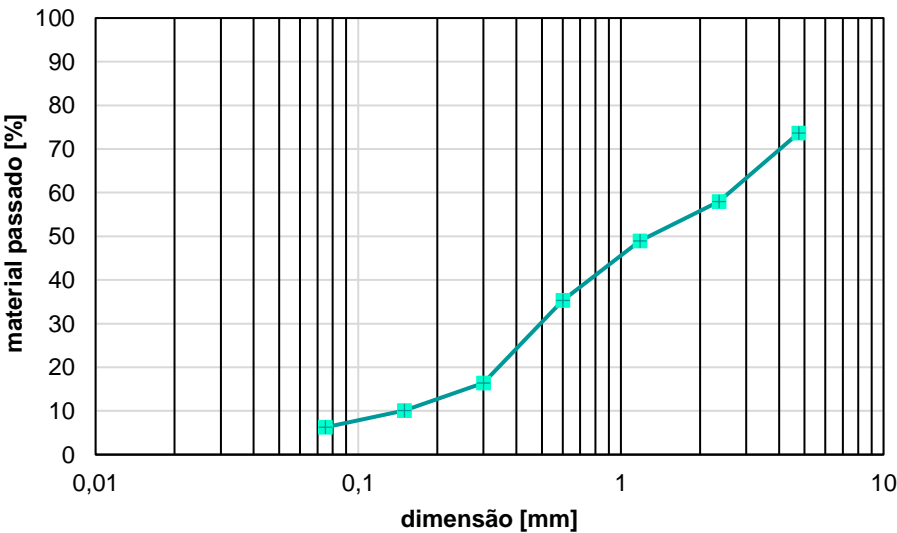


Figura A 78 - Curva granulométrica do provete RTT_T.1

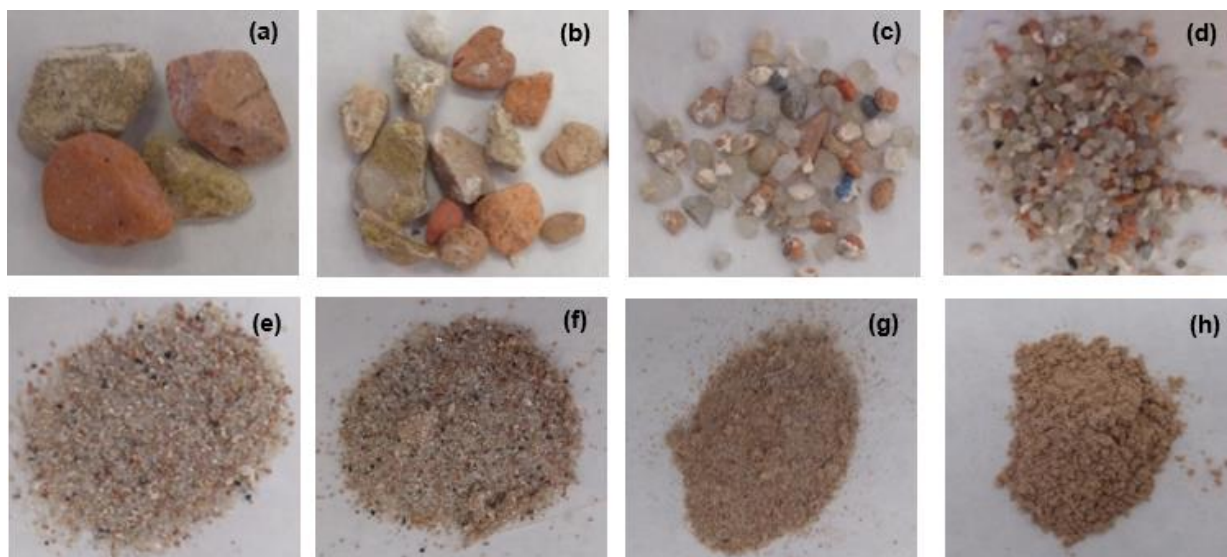


Figura A 79 - Análise granulométrica provete RTT_T.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 μm ; (e) fração 300 μm ; (f) fração 150 μm ; (g) fração 75 μm ; (h) fração < 75 μm

Amostra RTT_P – Ensaios químicos e mineralógicos



Figura A 80 - Amostra RTT_P selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

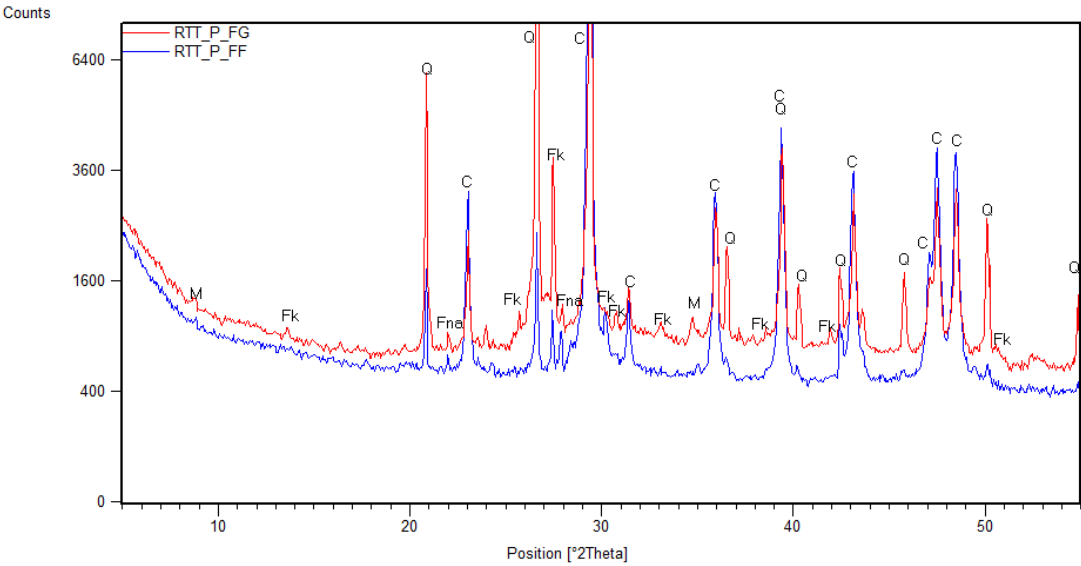


Figura A 81 - Difratoograma para o provete RTT_P.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul
Notação utilizada: M – Mica; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico; C – Calcite; Q – Quartz

ATG/dTG/ATD

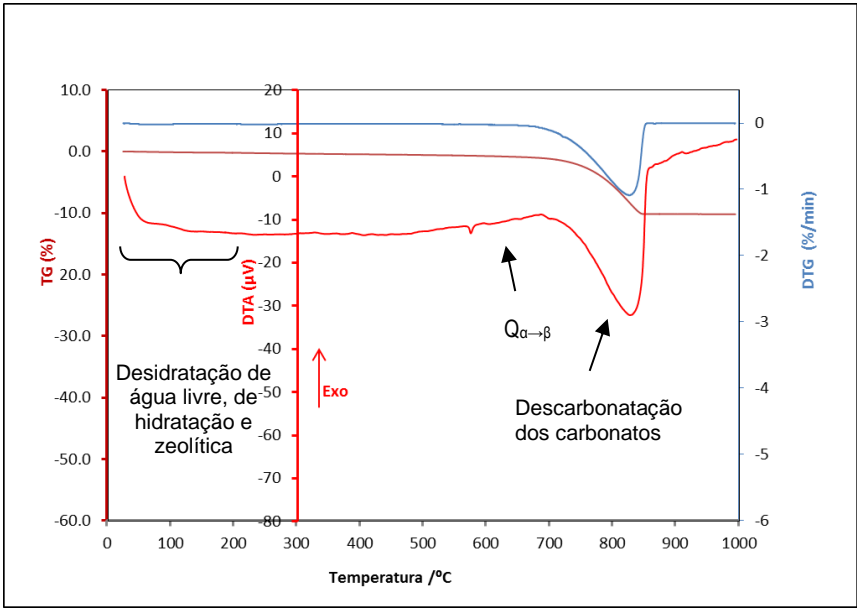


Figura A 82 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_P.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

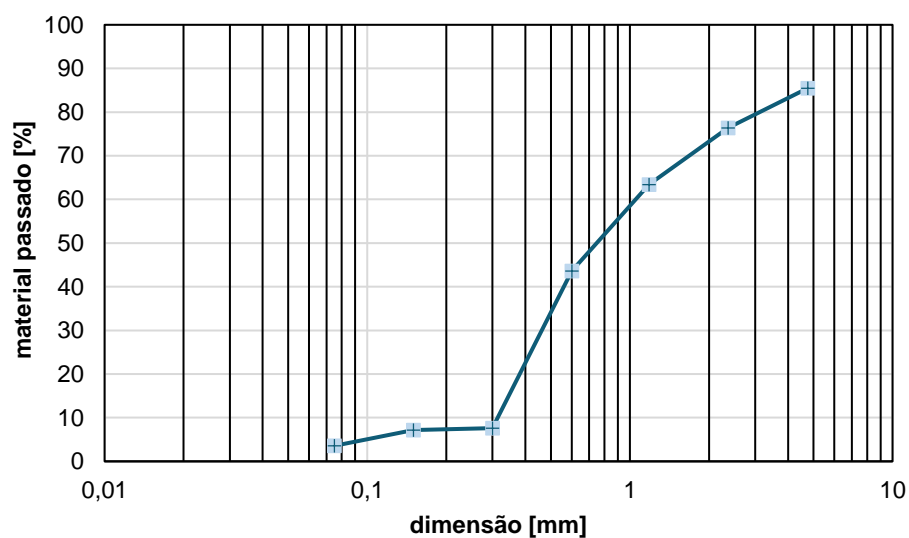


Figura A 83 – Curva granulométrica do provete RTT_P.1

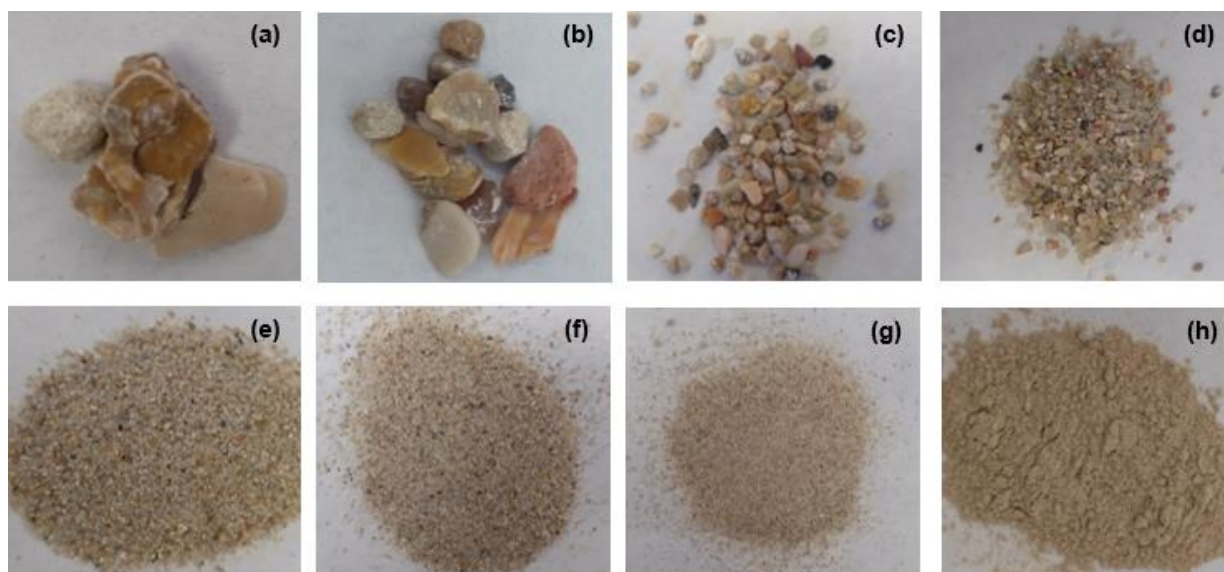


Figura A 84 - Análise granulométrica provete RTT_P.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Amostra RTT_M – Ensaios químicos e mineralógicos



Figura A 85 - Amostra RTT_M seleccionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

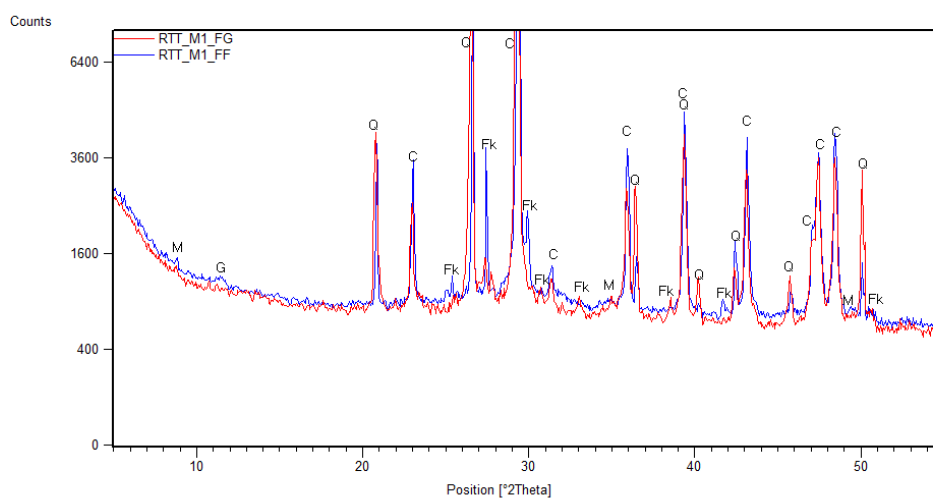


Figura A 86 - Difratoograma para o provete RTT_M.1

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; G – Gesso; Fk – Feldspato potássico; C – Calcite; Q – Quartzo

ATG/dTG/ATD

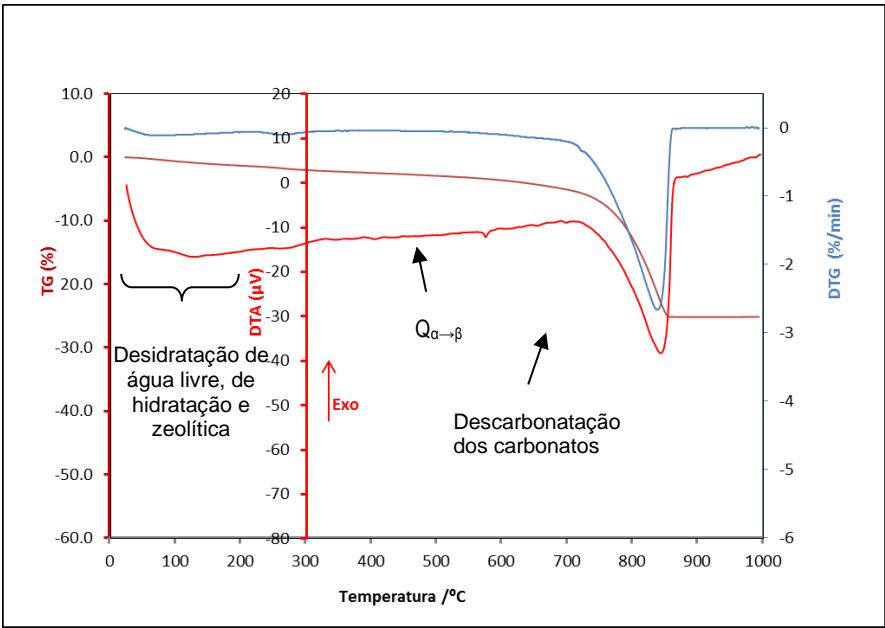


Figura A 87 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete RTT_M.1

Resultados: ensaio de análise granulométrica

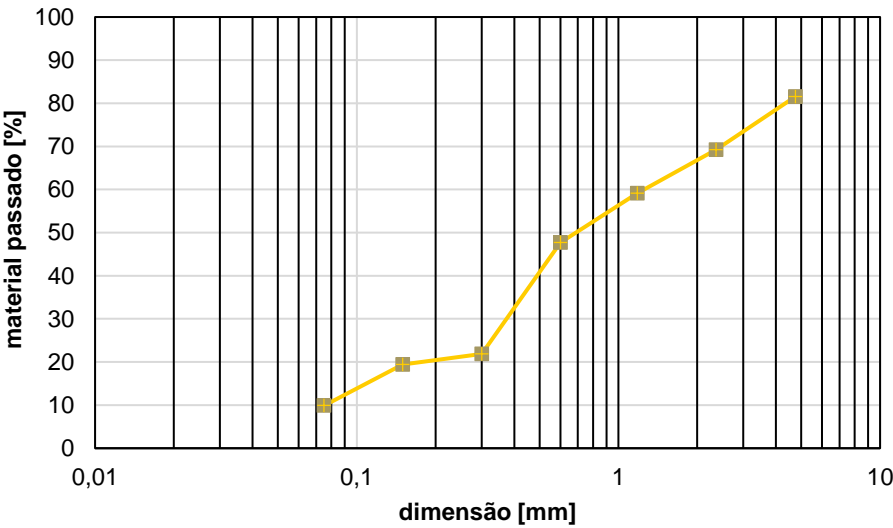


Figura A 88 - Curva granulométrica do provete RTT_M.1

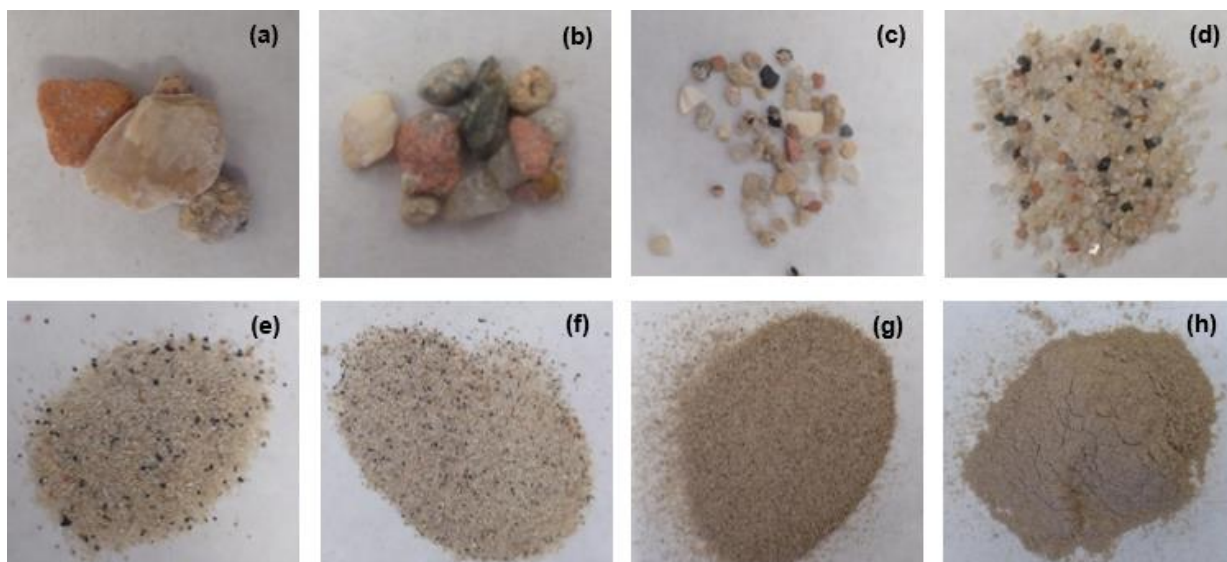


Figura A 89 - Análise granulométrica provete RTT_M.1: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Caso de estudo 9 – Largo da Graça

Amostra LG_M – Ensaaios químicos e mineralógicos



Figura A 90 - Amostra LG_M selecionada para ensaios químicos e mineralógicos

Resultados: ensaios químicos e mineralógicos

DRX

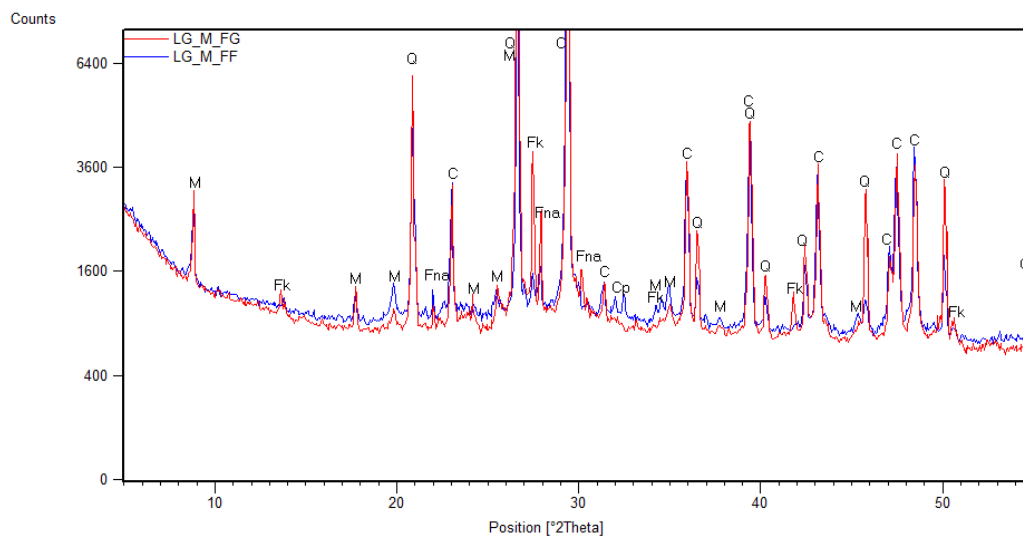


Figura A 91 - Difratograma para o provete LG_M

Fração global: vermelho; Fração fina: azul

Notação utilizada: M – Mica; Fk e Fna – Feldspato potássico e sódico, respetivamente; Q – Quartzos; C – Calcite; Cp – Silicatos anidros do clínquer Portland

ATG/dTG/ATD

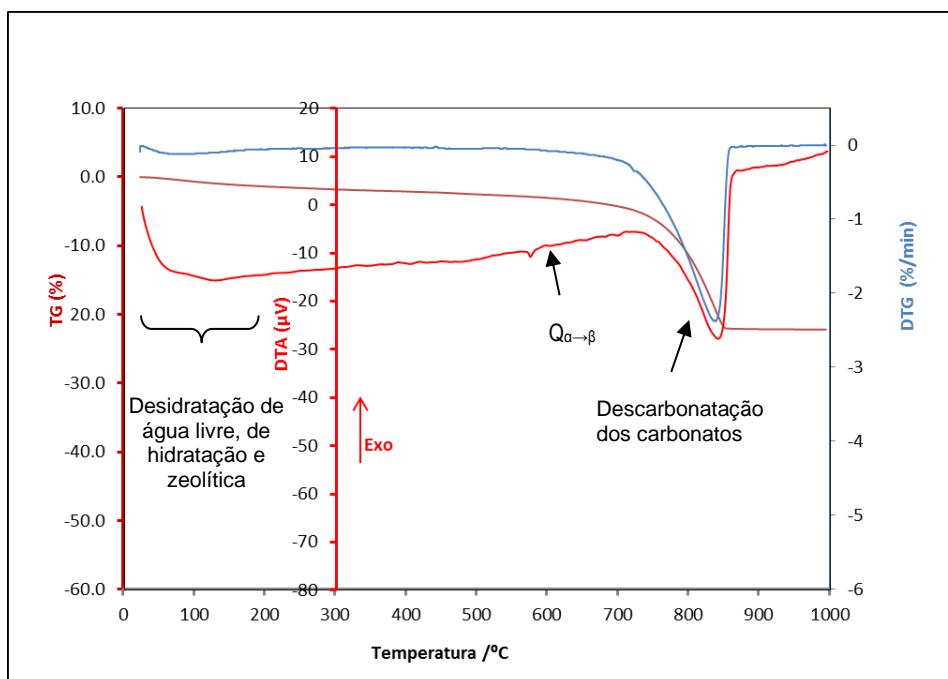


Figura A 92 - Análise ATG/dTG/ATD para o provete LG_M

Resultados: ensaio de análise granulométrica

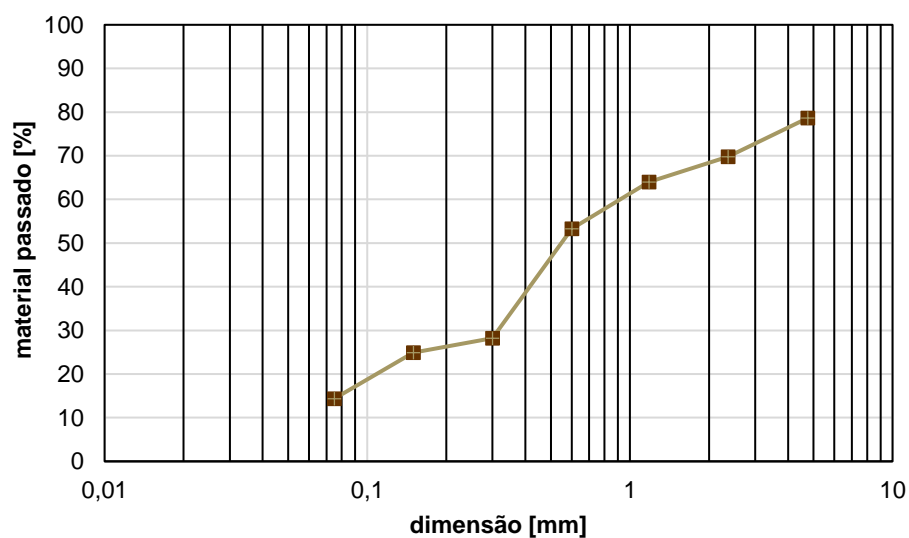


Figura A 93 – Curva granulométrica do provete LG_M

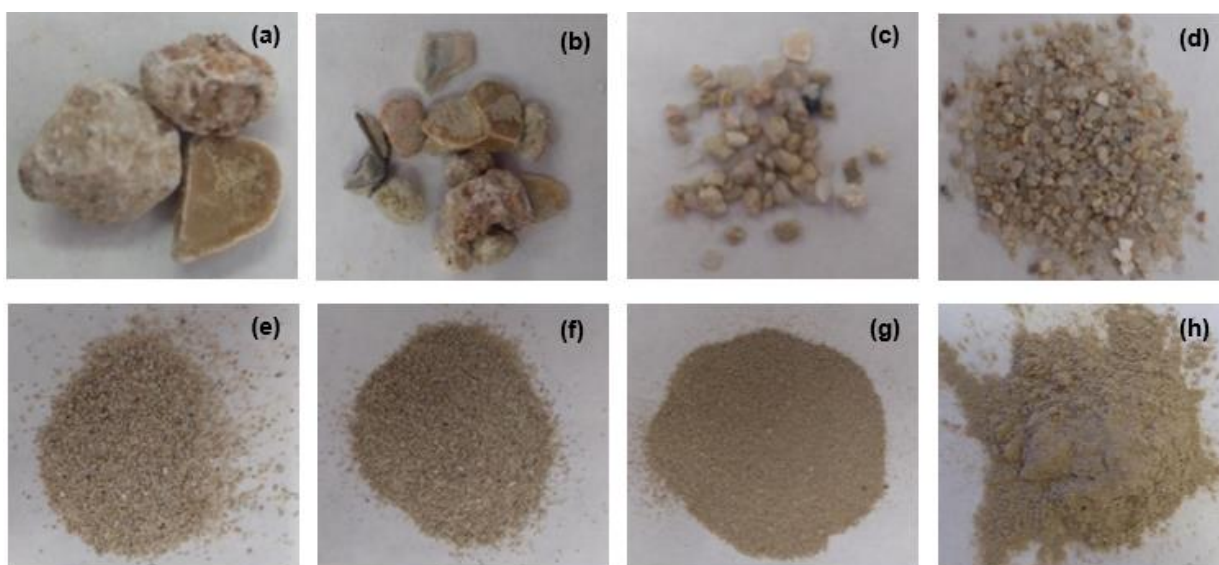


Figura A 94 - Análise granulométrica provete LG_M: (a) fração 4,75 mm; (b) fração 2,36 mm; (c) fração 1,18 mm; (d) fração 600 µm; (e) fração 300 µm; (f) fração 150 µm; (g) fração 75 µm; (h) fração < 75 µm

Anexo A4 – Resultados detalhados da caracterização físico-mecânica

Dureza superficial através do durômetro

Tabela A 11 – Resultados, em Shore A, da resistência superficial através do durômetro

Amostra	Provete	Resistência superficial [Shore A]													média	desvio padrão
JP_T1	JP_T1.3	98	97	98	95	94	89	90	92	97	84				93.4	4.6
JP_T2	JP_T2.1	96	98	82	97	99	94	91	97	94	92				94.0	4.9
JP_T3	JP_T3.1	98	94	90	97	87	98	99	98	94	91	94			94.5	3.9
	JP_T3.2	94	94	98	94	99	98	96	95	91	98				95.7	2.5
EGV_M1	EGV_M1.1	88	95	93	91	92	81	68	90	97	93				88.8	8.5
EGV_M2	EGV_M2.1	69	68	88	74	75	80	93	72	67	83	97	89	82	79.8	9.9
CSH_T1	CSH_T1.1	96	95	97	97	98	94	96	94	91	96				95.4	2.0
TB_T1	TB_T1.1	94	96	95	93	94	97	96	91	92	94				94.2	1.9
	TB_T1.2	98	96	98	98	97	97	98	96	97	96				97.1	0.9
TB_T2	TB_T2.1	97	94	97	94	82	98	84	87	92	96				92.1	5.8
	TB_T2.2	89	96	88	98	91	97	98	92	95	94				93.8	3.6
TB_M1	TB_M1.1	96	99	98	97	96	99	94	98	99	97				97.3	1.6
	TB_M1.2	97	96	90	97	97	96	97	98	97	96				96.1	2.2
TB_M2	TB_M2.1	95	94	98	97	96	94								95.7	1.6
	TB_M2.2	95	96	98	95	99	98	94							96.4	1.9
	TB_M2.3	95	97	94	95	96	99	88	86	91	95				93.6	4.1

Condutibilidade térmica

Tabela A 12 – Resultados, em W/(m.K), da condutibilidade térmica

Amostra	Provete	λ [W/m.K]		média	desvio padrão
JP_T1	JP_T1.3	1.64	1.95	1.8	0.22
JP_T2	JP_T2.1	0.35	1.81	1.1	1.03
JP_T3	JP_T3.1	0.64	1.39	1.0	0.53
	JP_T3.2	0.97	0.92	0.9	0.04
EGV_M1	EGV_M1.1	0.77	0.52	0.6	0.17
EGV_M2	EGV_M2.1	0.65	0.76	0.7	0.08
CSH_T1	CSH_T1.1	1.01	0.89	0.9	0.09
TB_T1	TB_T1.1	2.03	0.74	1.4	0.91
	TB_T1.2	0.86	1.24	1.1	0.27
TB_T2	TB_T2.1	1.25	0.89	1.1	0.25
	TB_T2.2	0.74	1.54	1.1	0.57
TB_M1	TB_M1.1	1.19	1.26	1.2	0.05
	TB_M1.2	1.27	0.74	1.0	0.37
TB_M2	TB_M2.1	0.66	0.97	0.8	0.22
	TB_M2.2	0.66	1.85	1.3	0.85
	TB_M2.3	0.48	1.97	1.2	1.05

Massa volúmica aparente

Tabela A 13 – Resultados, em kg/m³, da massa volúmica aparente

Amostra	Provete	massa [g]	altura h [mm]	diâmetro φ [mm]	massa [kg]	altura h [m]	diâmetro φ [m]	volume [m³]	massa volúmica ρ [kg/m³]	média	desvio padrão
JP_T1	JP_T1.3	511.854	74.67	74.88	0.512	0.075	0.075	0.000329	1556.6	1827.8	231.5
JP_T2	JP_T2.1	690.576	74.66	74.57	0.691	0.075	0.075	0.000326	2117.9		
JP_T3	JP_T3.1	604.51	74.65	74.52	0.605	0.075	0.075	0.000326	1856.7		
	JP_T3.2	581.468	74.92	74.51	0.581	0.075	0.075	0.000327	1780.0		
EGV_M1	EGV_M1.1	558.708	76.94	72.16	0.559	0.077	0.072	0.000315	1775.6	1835.1	84.1
EGV_M2	EGV_M2.1	611.421	76.5	73.29	0.611	0.077	0.073	0.000323	1894.5		
CSH_T1	CSH_T1.	598.247	76.79	73.28	0.598	0.077	0.073	0.000324	1847.2	1847.2	
TB_T1	TB_T1.1	623.559	74.74	74.7	0.624	0.075	0.075	0.000328	1903.7	1820.4	125.3
	TB_T1.2	589.416	75.01	74.45	0.589	0.075	0.074	0.000327	1805.0		
TB_T2	TB_T2.1	624.574	74.53	74.48	0.625	0.075	0.074	0.000325	1923.5		
	TB_T2.2	539.784	75.16	74.46	0.540	0.075	0.074	0.000327	1649.3		
TB_M1	TB_M1.1	588.07	75.12	74.45	0.588	0.075	0.074	0.000327	1798.3	1743.9	55.5
	TB_M1.2	589.906	75.24	74.34	0.590	0.075	0.074	0.000327	1806.3		
TB_M2	TB_M2.1	559.112	75.24	74.36	0.559	0.075	0.074	0.000327	1711.1		
	TB_M2.2	544.614	75.21	74.06	0.545	0.075	0.074	0.000324	1681.0		
	TB_M2.3	546.887	74.6	73.61	0.547	0.075	0.074	0.000317	1722.6		

Módulo de elasticidade dinâmico

Tabela A 14 – Resultados, em MPa, do módulo de elasticidade dinâmico

Amostra	Provete	diâmetro [mm]	altura [mm]	massa [g]	valor de b [mm]	Ed [MPa]																média	desvio-padrão
JP_T1	JP_T1.3 -1	74.88	74.67	512.854	66.36	1259	1257	1268	1373	1461											1323.60	90.86	
JP_T2	JP_T2-1	74.57	74.66	690.576	66.09	1395	1388	1372	1285	1292	1289	1396	1278								1336.88	55.01	
JP_T3	JP_T3-1	74.52	75.65	604.51	66.04	1316	1190	1441	1501	1405	1200										1342.17	128.84	
	JP_T3-2	74.51	74.92	581.068	66.03	1298	1485	1283	1200	1192	1329	1403	1411	1501	1316						1341.80	107.05	
EGV_M1	EGV_M1.1-1	73.29	76.5	611.421	64.95	1472	1495	1632	1650	1099	1155	1263	1373	1422	1503	1517	1611	1435	1527	1618	1653	1464.06	169.94
EGV_M2	EGV_M2-1	72.16	76.94	558.708	63.95	1780	1808	1912	1394	1522	1568	1588	1498	1579	1628	1776	1505	1640	1717	1745		1644.00	141.82
CSH_T1	CSH_T1	73.28	76.79	598.247	64.94	1827	1345	1446	1471	1557	1650	1342	1449	1542								1514.33	153.27
TB_T1	TB_T1.1-1	74.7	75.74	623.559	66.20	1334	1339	1415	1438	1341	1439	1543	1642	1224	1445							1416.00	117.47
	TB_T1.2-1	74.45	75.01	589.416	65.98	1103	1317	1394	1512	1240	1346	1421	1532	1244	1338	1405	1243	1350				1341.92	117.46
TB_T2	TB_T2-1	74.48	74.53	624.574	66.01	1654	1746	1813	1328	1425	1312	1383	1484	1610	1147	1571	1648					1510.08	197.51
	TB_T2-2	74.46	75.16	539.784	65.99	1101	1136	1204	1049	1219	1331	1443										1211.86	136.81
TB_M1	TB_M1-1	74.45	75.12	588.07	65.98	1262	1355	1434	1540	1255	1358	1437	1689	1254	1353	1434	1549	1254	1337	1425	1527	1403.94	126.01
	TB_M1-2	74.34	75.24	588.906	65.88	1275	1360	1372	1447	1269	1357	1448	1528	1262	1329	1255	1353	1441				1361.23	85.33
TB_M2	TB_M2-1	74.36	75.24	559.112	65.90	1493	1608	1832	1210	1300	1399	1201	1301	1388	1480	1209	1300	1380	1498			1399.93	174.77
	TB_M2-2	74.06	75.21	544.614	65.63	1175	1265	1333	1422	1178	1261	1341	1180	1281	1683	1722	1170	1246	1344	1437		1335.87	171.48
	TB_M2-3	73.61	74.6	546.887	65.24	1487	1681	1204	1299	1377	1630	1190	1274	1360	1681	1183	1270	1360	1445			1388.64	174.29

Anexo A5 – Resultados detalhados da caracterização química e mineralógica

Resíduo insolúvel

Tabela A 15 – Resultados, em %, do resíduo insolúvel para cada provete analisado

Amostra	Provete	fracção do provete	mfracção inicial [g]	mfracção inicial [%]	mprovete total inicial [g]	mcadinho vazio [g]	mfracção final [g]	mprovete total final [g]	mfracção final [%]	Agregado calcário separado [%]	RI [%]	Teor de areia siliciosa [%]	Teor de agregado total na amostra [%]
JP_T1	JP_T1.2	JP_T1.2 _{ac}	1.7035	16.16	10.5419	30.1783	0.8004	5.7205	13.99	7.59	46.67	46.67	54.26
		JP_T1.2 _{as}	8.8384	83.84		48.2882	4.9201		86.01				
	JP_T1.3	JP_T1.3 _{ac}	3.7792	29.82	12.6748	30.0565	3.3328	7.1971	46.31	26.29	30.49	30.49	56.78
		JP_T1 _{as}	8.8956	70.18		49.0755	3.8643		53.69				
JP_T3	JP_T3.1	JP_T3.1 _{ac}	0.1322	1.10	12.0132	29.8701	0.1289	8.9754	1.44	1.07	73.64	73.64	74.71
		JP_T3.1 _{as}	11.8810	98.90		51.7011	8.8465		98.56				
JP_T4	JP_T4	JP_T4 _{ac}	0.2106	1.73	12.2069	29.1008	0.1727	7.0448	2.45	1.41	56.30	56.30	57.71
		JP_T4 _{as}	11.9963	98.27		48.5427	6.8721		97.55				
CS_C	CS_C	CS_C _{ac}	1.7655	14.00	12.6139	28.7078	1.1882	7.4401	15.97	9.42	49.56	49.56	58.98
		CS_C _{as}	10.8484	86.00		52.9135	6.2519		84.03				
PI_M	PI_M	PI_M _{ac}	7.4097	45.27	16.3664	27.6216	6.4363	12.6327	50.95	39.33	37.86	37.86	77.19
		PI_M _{as}	8.9567	54.73		48.8426	6.1964		49.05				
EGV_M1	EGV_M1.2	EGV_M1.2 _{ac}	1.7532	12.36	14.1829	48.8071	0.6059	8.3679	7.24	4.27	54.73	54.73	59.00
		EGV_M1.2 _{as}	12.4297	87.64		30.1531	7.7620		92.76				
EGV_M2	EGV_M2.2	EGV_M2.2 _{ac}	2.0540	21.62	9.5023	31.1514	1.7738	5.8477	30.33	18.67	42.87	42.87	61.54
		EGV_M2.2 _{as}	7.4483	78.38		49.6297	4.0739		69.67				
PR_M3	PR_M3.1	PR_M3.1 _{ac}	1.5741	14.15	11.1215	30.2974	1.0589	6.2588	16.92	9.52	46.76	46.76	56.28
		PR_M3.1 _{as}	9.5474	85.85		49.2538	5.1999		83.08				
PR_M6	PR_M6.1	PR_M6.1 _{ac}	0.4249	3.18	13.3734	30.1996	0.4015	10.9690	3.66	3.00	79.02	79.02	82.02
		PR_M6.1 _{as}	12.9485	96.82		47.1561	10.5675		96.34				

Tabela A 15 – Resultados, em %, do resíduo insolúvel para cada provete analisado (continuação)

CSH_T2	CSH_T2.1	CSH_T2.1 _{ac}	1.0623	8.27	12.8387	53.0847	0.6881	8.8105	7.81	5.36	63.26	63.26	68.62
		CSH_T2.1 _{as}	11.7764	91.73		48.6919	8.1224		92.19				
TB_M1	TB_M1.3	TB_M1.3 _{ac}	0.8593	6.81	12.6264	29.2063	0.8083	8.2839	9.76	6.40	59.21	59.21	65.61
		TB_M1.3 _{as}	11.7671	93.19		51.4876	7.4756		90.24				
TB_M2	TB_M2.4	TB_M2.4 _{ac}	0.4293	4.34	9.8975	30.5432	0.3959	8.0949	4.89	4.00	77.79	77.79	81.79
		TB_M2.4 _{as}	9.4682	95.66		52.6345	7.6990		95.11				
TB_T1	TB_T1.1	TB_T1.1 _{ac}	3.1616	27.97	11.3031	29.2825	2.5717	7.3993	34.76	22.75	42.71	42.71	65.46
		TB_T1.1 _{as}	8.1415	72.03		48.7219	4.8276		65.24				
RTT_P	RTT_P.1	RTT_P.1 _{ac}	1.7139	15.96	10.7412	28.9153	1.4605	8.5206	17.14	13.60	65.73	65.73	79.33
		RTT_P.1 _{as}	9.0273	84.04		48.6471	7.0601		82.86				
RTT_T	RTT_T.1	RTT_T.1 _{ac}	1.5940	13.41	11.8863	29.3947	1.2405	5.4108	22.93	10.44	35.08	35.08	45.52
		RTT_T.1 _{as}	10.2923	86.59		48.2482	4.1703		77.07				
RTT_M	RTT_M.1	RTT_M.1 _{ac}	1.3522	12.59	10.7376	29.7215	0.8978	5.6473	15.90	8.36	44.23	44.23	52.59
		RTT_M.1 _{as}	9.3854	87.41		47.7429	4.7495		84.10				
LG_M	LG_M	LG_M _{ac}	2.0758	19.08	10.8800	24.0229	1.9576	8.1291	24.08	17.99	56.72	56.72	74.72
		LG_M _{as}	8.8042	80.92		51.9846	6.1715		75.92				

Notação: (ac) – fração do provete com agregado calcário separado manualmente; (as) – fração do provete com agregado silicioso

Determinação da curva granulométrica

Tabela A 16 – Resultados da análise granulométrica dos agregados de cada provete

Identificação do provete		JP_T1.2		JP_T1.3		JP_T3.3		JP_T4	
Peneiro	Abertura da malha [mm]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]
4	4.75	9.51	90.49	52.68	47.32	23.38	76.62	7.07	92.93
8	2.36	32.24	58.25	11.20	36.12	11.02	65.61	5.95	86.98
16	1.18	10.10	48.14	6.78	29.34	9.42	56.18	9.00	77.97
30	0.6	11.74	36.40	5.84	23.50	16.77	39.41	11.90	66.08
50	0.3	16.34	20.06	11.36	12.15	19.83	19.58	30.55	35.53
100	0.15	6.84	13.22	2.05	10.09	2.94	16.65	10.13	25.40
200	0.075	6.84	6.39	5.21	4.89	7.47	9.18	15.11	10.29
refugo (fundo)		6.39	0.00	4.89	0.00	9.18	0.00	10.29	0.00
D [mm]		D	4.75	D	-	D	-	D	4.75
Mf [%]		Mf	3.3	Mf	4.4	Mf	3.3	Mf	2.2
Identificação do provete		CS_C.1		PI_M.1		EGV_M1.2		EGV_M2.2	
Peneiro	Abertura da malha [mm]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]	Material retido [%]	Material que passa [%]
4	4.75	29.50	70.50	56.89	43.11	3.96	96.04	9.49	90.51
8	2.36	6.40	64.10	6.42	36.68	5.87	90.17	24.60	65.92
16	1.18	6.92	57.18	6.32	30.36	15.33	74.84	10.45	55.47
30	0.6	10.44	46.74	5.49	24.87	16.73	58.11	5.95	49.52
50	0.3	17.23	29.50	12.12	12.75	24.01	34.10	11.41	38.10
100	0.15	16.58	12.92	2.59	10.16	1.02	33.08	4.82	33.28
200	0.075	6.92	6.01	4.66	5.49	17.88	15.20	14.15	19.13
refugo (fundo)		6.01	0.00	5.49	0.00	15.20	0.00	19.13	0.00
D [mm]		D	-	D	-	D	2.36	D	4.75
Mf [%]		Mf	3.2	Mf	4.4	Mf	2.1	Mf	2.7

Tabela A 16 – Resultados da análise granulométrica dos agregados de cada provete (continuação)

Identificação do provete		PR_M3.1		PR_M6.1		CSH_T2.1		TB_M1.3	
Peneiro	abertura da malha [mm]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]
4	4.75	4.08	95.92	0.00	100.00	16.82	83.18	5.12	94.88
8	2.36	12.72	83.20	12.38	87.62	5.88	77.29	13.80	81.08
16	1.18	12.87	70.33	22.50	65.12	9.06	68.24	14.37	66.71
30	0.6	19.00	51.33	30.25	34.88	17.06	51.18	8.82	57.89
50	0.3	27.63	23.70	22.40	12.48	38.94	12.24	11.10	46.80
100	0.15	15.70	8.01	1.98	10.49	2.94	9.29	3.27	43.53
200	0.075	3.61	4.40	4.91	5.58	4.59	4.71	14.79	28.73
refugo (fundo)		4.40	0.00	5.58	0.00	4.71	0.00	28.73	0.00
D [mm]		D	4.75	D	4.75	D	-	D	4.75
Mf [%]		Mf	2.7	Mf	2.9	Mf	3.0	Mf	2.1
Identificação do provete		TB_M2.4		TB_T1.1		RTT_P.1		RTT_T.1	
Peneiro	abertura da malha [mm]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]
4	4.75	0.00	100.00	35.35	64.65	14.53	85.47	26.34	73.66
8	2.36	9.29	90.71	13.20	51.44	9.11	76.35	15.65	58.01
16	1.18	7.98	82.72	10.45	40.99	12.93	63.42	9.02	48.99
30	0.6	8.12	74.61	8.25	32.74	19.83	43.60	13.63	35.36
50	0.3	14.53	60.08	12.10	20.63	35.96	7.64	18.97	16.39
100	0.15	1.57	58.51	0.96	19.67	0.49	7.14	6.26	10.13
200	0.075	25.00	33.51	9.63	10.04	3.57	3.57	3.87	6.26
refugo (fundo)		33.51	0.00	10.04	0.00	3.57	0.00	6.26	0.00
D [mm]		D	2.36	D	-	D	-	D	-
Mf [%]		Mf	1.3	Mf	3.7	Mf	3.2	Mf	3.6

Tabela A 16 – Resultados da análise granulométrica dos agregados de cada provete (continuação)

Identificação do provete		RTT_M.1		LG_M	
Peneiro	abertura da malha [mm]	material retido [%]	material que passa [%]	material retido [%]	material que passa [%]
4	4.75	18.44	81.56	21.37	78.63
8	2.36	12.36	69.20	8.83	69.80
16	1.18	10.08	59.13	5.84	63.96
30	0.6	11.41	47.72	10.68	53.28
50	0.3	25.86	21.86	25.07	28.21
100	0.15	2.47	19.39	3.28	24.93
200	0.075	9.51	9.89	10.54	14.39
refugo (fundo)		9.89	0.00	14.39	0.00
D [mm]		D	-	D	-
Mf [%]		Mf	3.0	Mf	2.8

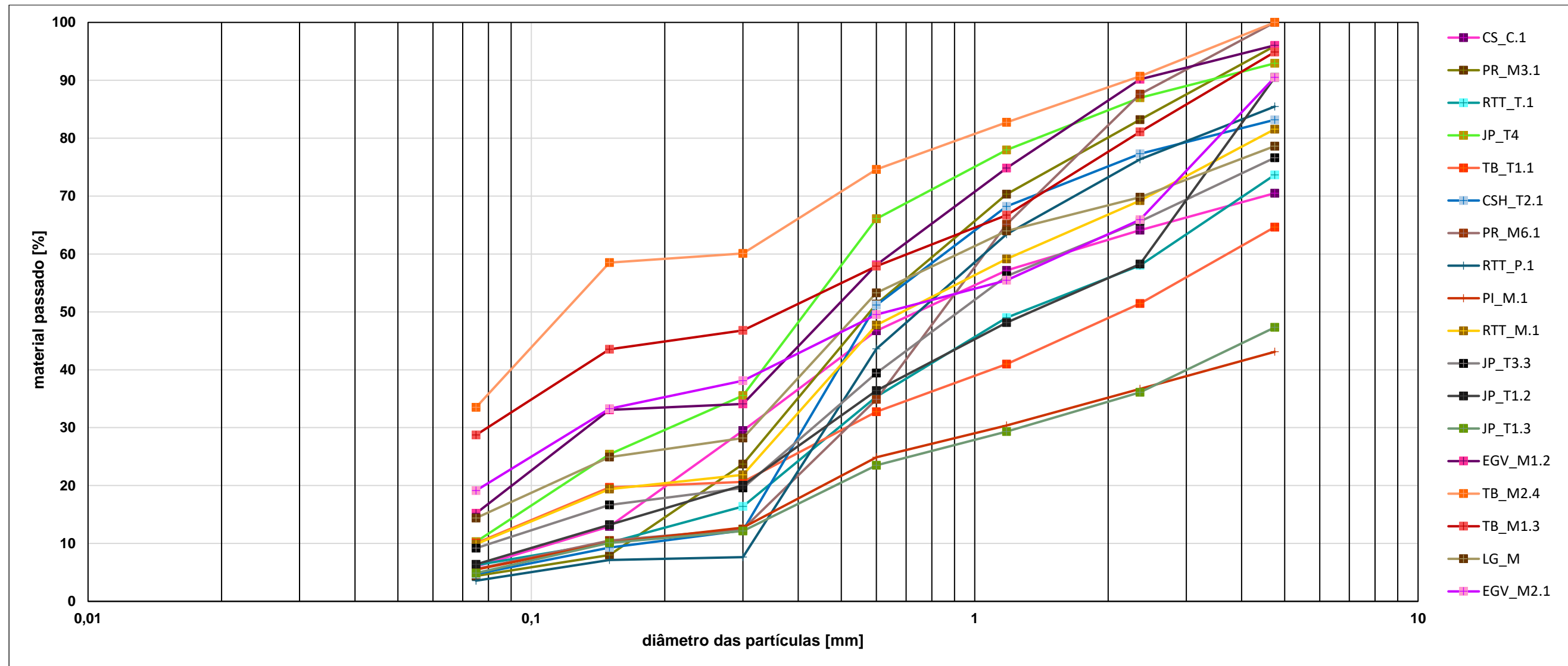


Figura A 95 – Curvas granulométricas dos provetes selecionados para os ensaios mineralógicos e químicos

